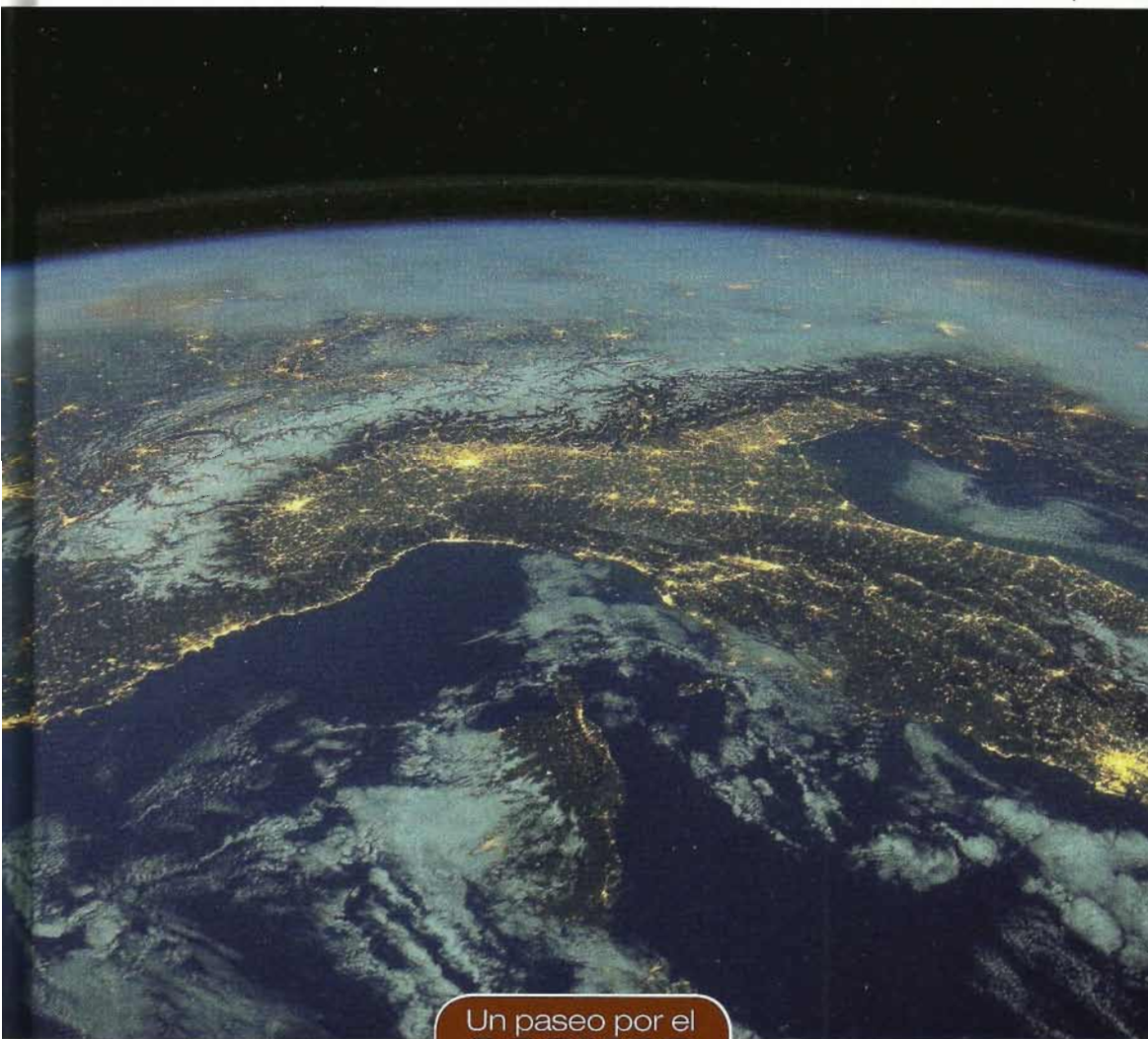


La Tierra

Nuestro hogar
en el universo



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmureau.blogspot.com/>

La Tierra

Nuestro hogar
en el universo

RBA

Imagen de cubierta: Vista nocturna de Italia, los Alpes y el Mediterráneo
captada desde la Estación Espacial Internacional.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Joel Gabás Masip por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO): 39; James L. Amos: 143a;
Archivo RBA: 21a, 75a, 75b, 115a, 127b; ESA/NASA: portada; Håvard
Berland/Wikimedia Commons: 101c; Giovanni Corigliano: 57a, 57b; Alexander
Franke/Wikimedia Commons: 21b; Luca Galuzzi/Wikimedia Commons: 73b;
S. Kavosi/I. Raeder/UNH: 127a; NASA: 55b; NASA/SDO: 55a; NOAA: 73a;
SanAndreasFault.org (SAF): 101b; Scott Robert Anselmo/Wikimedia Commons:
143b; Robert Stone: 115b; WILPrZ/Wikimedia Commons: 101a.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de
esta publicación puede ser reproducida, almacenada
o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-470-8789-2

Depósito legal: B-1707-2017

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	El camino hasta nuestra visión actual 13
CAPÍTULO 2	Nuestro planeta y el universo 33
CAPÍTULO 3	La superficie terrestre 59
CAPÍTULO 4	Bajo la superficie: las fuerzas internas 81
CAPÍTULO 5	Sobre la superficie: las capas fluidas 103
CAPÍTULO 6	La vida 129
LECTURAS RECOMENDADAS	153
ÍNDICE	155

Desde un punto de vista astronómico, la Tierra es tan solo uno de los planetas que orbitan alrededor de una estrella entre cientos de miles de millones en una galaxia entre cientos de miles de millones. Aunque puede parecer que tiene un papel insignificante en el universo, hay algo que la hace especial: a día de hoy, es el único astro donde sabemos que ha sido capaz de florecer la vida. También es cierto que no conocemos muchos más y que la vida podría ser más frecuente de lo que creemos. De hecho, tan solo hemos explorado astros del sistema solar, donde no está descartada su existencia. Hasta ahora no se han encontrado, pero se siguen buscando activamente indicios de vida presente o pasada en Marte. Además, se han detectado también en algunos satélites de Júpiter y Saturno entornos con algunas de las características necesarias para su desarrollo. Volviendo a la Tierra, se calcula que la vida se originó relativamente poco después de su formación, hace unos 4600 millones de años, aunque durante miles de millones de años esta se limitó a organismos unicelulares. Los seres vivos multicelulares complejos existen desde hace al menos 540 millones de años, momento en el que se diversificaron de forma espectacular, dando lugar

a multitud de especies, incluida la nuestra. El ser humano es relativamente reciente, ya que apareció hace tan solo algo más de 200 000 años. No se trata de una aparición repentina, sino que las distintas especies son el resultado de un lento proceso de evolución en el que los ejemplares mejor adaptados de cada generación pasan sus características a la siguiente. Este camino no ha sido sencillo e incluso, quién sabe, puede que simplemente debamos nuestra existencia a un conjunto de casualidades. En todo caso, estas casualidades se han dado en las condiciones favorables que ha ofrecido nuestro planeta.

Una de las características distintivas de nuestra especie en comparación con otras es la capacidad de comprender la realidad a través de modelos complejos. Es lo que se conoce como inteligencia, y se puede definir como la capacidad de adquirir información, ordenarla y utilizarla para conseguir algún objetivo. Ya desde nuestros inicios, la hemos usado para construir herramientas, en el dominio del fuego y, probablemente, para predecir las estaciones mediante la observación de los astros. Hemos aprendido mucho desde entonces, ya que los primeros individuos de nuestra especie ni siquiera podían imaginar que la Tierra era un simple astro, al igual que los puntos luminosos que veían en el cielo. Las primeras sospechas sobre la esfericidad terrestre tuvieron lugar no hace mucho más de dos milenios y se certificaron hace tan solo cinco siglos, tras las primeras circunnavegaciones. Este hecho dio pie a la toma de conciencia de que la Tierra es solamente uno de los planetas que orbitan alrededor del Sol, astro que ejerce una influencia decisiva sobre ella. La radiación electromagnética que emite esta estrella condiciona enormemente las características de nuestro planeta y de los seres que vivimos sobre él. Tanto es así que desde las células vegetales hasta nuestros receptores oculares están perfectamente calibrados para aprovechar las frecuencias que emite con máxima intensidad.

La comprensión del mundo a través de modelos complejos nos proporciona muchas ventajas, como la posibilidad de realizar predicciones. Un caso paradigmático con el que estamos muy familiarizados son las predicciones meteorológicas. Saber

el tiempo que va a hacer nos resulta de gran utilidad para planificar, entre otras muchas cosas, si tenemos que coger o no el paraguas al salir de casa. Acertar estas predicciones puede ser crítico en determinados casos, como por ejemplo en la trayectoria de un ciclón tropical. Los modelos que usamos se sustentan en multitud de observaciones recopiladas durante siglos, y para realizar las predicciones contamos con una miríada de datos obtenidos por vías diversas, incluidos los satélites artificiales. Aplicando los modelos a los datos de hoy podemos estimar la situación de mañana. Aunque es mucho lo que se ha ganado en el pronóstico de las predicciones meteorológicas, lo cierto es que tan solo pueden realizarse de forma aceptable para unos pocos días. Pero es que, en el caso de la predicción de otros fenómenos como los terremotos, ni siquiera hemos llegado a ese nivel, por lo que nos resulta imposible predecirlos. El día que podamos prever los terremotos con precisión suficiente, podremos salvar miles de vidas. El intentar evitar las consecuencias de los desastres naturales, ya sean terremotos o ciclones tropicales, está en la propia naturaleza del ser humano y es una de nuestras motivaciones principales para seguir avanzando en el conocimiento de la Tierra.

Antes de avanzar en el conocimiento de nuestro planeta, es necesario hacer un repaso de cuál es el estado actual. Para empezar, sabemos que muchos de los procesos físicos que se dan en la Tierra son consecuencia más o menos directa de la radiación solar que recibe. Por ejemplo, la abundante cantidad de agua líquida que alberga su superficie tiene mucho que ver con su distancia al Sol. Si esta distancia fuera menor o mayor, recibiría más o menos radiación y el agua se evaporaría o congelaría. Hay otros factores que condicionan la existencia de agua líquida sobre la superficie terrestre, como la capa gaseosa que la envuelve, preservando y repartiendo el calor. En este sentido, juega también un papel importante el campo magnético terrestre, que protege a las dos capas fluidas de las emisiones de partículas solares. Por otro lado, debido a la esfericidad terrestre, la radiación solar se recibe con intensidades distintas en las diversas áreas, calentando de forma diferente las capas fluidas y marcando

do así su dinámica. Además, la mayor o menor radiación varía a diario a lo largo de círculos definidos por el eje de rotación, que a su vez modifica anualmente su dirección relativa al Sol. Estas variaciones son, respectivamente, las responsables de los ciclos día-noche y de las cuatro estaciones. Las tendencias anuales definen unas zonas climáticas en franjas, que, a su vez, marcan el reparto de la riqueza biológica. Otra de las consecuencias de la dinámica de las capas fluidas es el modelado de los paisajes a través de la erosión y del transporte de los materiales. El factor nivelador que eso representa no ha acabado con el relieve de la superficie, ya que existen fuerzas interiores que generan nuevos desniveles, además de ser también las responsables de la sismicidad y el vulcanismo.

Por último, si bien es cierto que la Tierra es el único planeta donde sabemos que se ha desarrollado la vida, es posible que existan otros que la albergan o bien la han albergado en algún momento. En las últimas décadas se han puesto en marcha programas para detectar planetas fuera del sistema solar, y se han encontrado miles hasta el momento. Es altamente probable que algunos de ellos tengan características parecidas al nuestro y puedan albergar vida. De todas formas, es tal el desconocimiento que tenemos de lo que ocurre fuera del sistema solar que hasta 2016 no sabíamos que existía un planeta orbitando a Próxima Centauri, la estrella más cercana, situada a tan solo cuatro años-luz de nosotros. Parece ser que es más masivo que la Tierra y que se encuentra en la zona donde la radiación permitiría la existencia de cantidades significativas de agua líquida. Esto no significa que exista vida, ya que las características de este planeta son distintas a las terrestres. Próxima Centauri es menos masiva, más fría y emite menos radiación que el Sol, estando el planeta mucho más cerca de su estrella que la Tierra. Su periodo orbital es de tan solo once días y es muy probable que presente un periodo de rotación sincrónico, es decir, que siempre dé la misma cara a la estrella, como la Luna a la Tierra. Esta es una configuración muy habitual en los satélites del sistema solar y el hecho de que el planeta esté tan cerca de Próxima Centauri hace pensar que también es su caso. En

estas condiciones podría existir agua líquida en las zonas de transición entre el día y la noche, o incluso más allá si el planeta contara con atmósfera. En cualquier caso, el mejor planeta que conocemos para ser habitado los próximos miles de millones de años sigue siendo el nuestro.

El camino hasta nuestra visión actual

Ya en el siglo III a.C., en la mítica biblioteca de Alejandría, Eratóstenes había calculado la circunferencia terrestre. Sin embargo, la esfericidad de la Tierra no fue aceptada por todo el mundo hasta que se hizo evidente tras completar las primeras vueltas al mundo, en el siglo XVI.

Hoy en día nos parece obvio que la Tierra es esférica: así lo hemos aprendido. Multitud de imágenes mostrando la esfericidad de nuestro planeta figuran en el imaginario colectivo. Sin embargo, si miramos hacia atrás en la historia, no fue nada sencillo llegar a esta conclusión. Si nos olvidamos por un segundo de que sabemos que la Tierra es una esfera, no hay nada que nos dé indicios de que esa es su condición. De hecho, no es nada extraño que durante siglos nuestros antecesores creyeran que era plana. ¿No es así como parece, de entrada, desde el punto de vista de un diminuto humano que ojea a su alrededor desde algún punto de su superficie?

Las primeras hipótesis conocidas que consideraban la Tierra como una esfera se remontan a la antigua Grecia, donde incluso se llegó a calcular la circunferencia terrestre con bastante precisión. El primer valor conocido fue obtenido por Eratóstenes en la biblioteca de Alejandría, a partir de las distintas posiciones relativas del Sol en el cielo visto desde esta ciudad y desde la actual Asuán. Sin embargo, hay que decir que la esfericidad de la Tierra no fue ampliamente aceptada hasta el siglo XVI tras completarse las primeras vueltas al planeta, gozando solamente de

una cierta difusión en ámbitos reducidos. Años antes, cuando en 1492 Colón se lanzó en su viaje a las Indias intentando rodear la Tierra, aunque contaba ya con varias estimaciones de su circunferencia, creía que era mucho más pequeña por una interpretación optimista en la conversión de las unidades de longitud. Así pues, se puede decir que tuvo bastante suerte de encontrarse el continente americano.

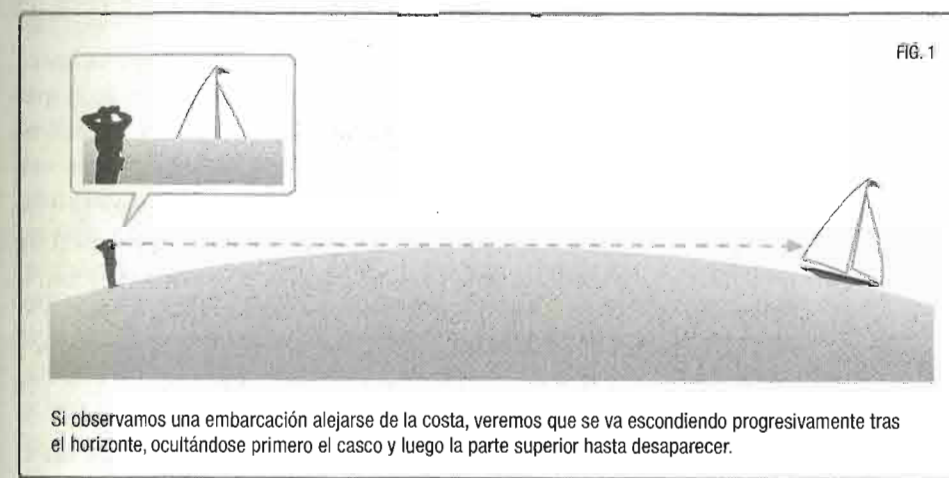
En los siglos posteriores a ese viaje, las naciones europeas iniciaron un proceso de exploración del mundo que ya no dejaba lugar a dudas sobre la esfericidad terrestre. A partir de entonces se allanó el camino para el desarrollo de una serie de teorías heliocéntricas, en las que la Tierra era un simple planeta orbitando alrededor del Sol, que fueron culminadas por la teoría de la gravedad. Por otro lado, todas las informaciones recopiladas sobre los nuevos territorios descubiertos potenciaron también el desarrollo de otras nuevas teorías científicas, como las uniformistas en geología y evolucionistas en biología. La exploración y posterior colonización europea del mundo trajo también consigo un cambio de escala. Desde entonces, el desarrollo de los medios de producción, de transporte y finalmente de comunicación ha transformado aún más nuestra visión del planeta. En la actualidad contamos con una gran red de satélites y telecomunicaciones que nos permiten entender con gran precisión fenómenos de dimensiones planetarias casi en tiempo real.

SE CONSTATA: LA TIERRA ES REDONDA

Las primeras hipótesis conocidas sobre la esfericidad de la Tierra en la antigua Grecia se basaban en observaciones sencillas realizables a simple vista. En una civilización de navegantes como la griega, se sabía que, al alejarse, los veleros desaparecían progresivamente tras la línea del horizonte, dejando ver en los estadios finales solamente la parte superior de sus velas (figura 1). Lo mismo ocurría desde el velero: conforme se iba alejando, se perdía la visual de las partes bajas de la línea costera. Esta observación se realizó con frecuencia teniendo en

cuenta que, a poca altura, como en la cubierta de un velero, la línea del horizonte no dista más de varios kilómetros. La pérdida de la visual del suelo tras el horizonte dejaba ya entrever la curvatura terrestre, pero se conocían también otros indicios que señalaban su esfericidad, aunque eran de más compleja interpretación, ya que tenían que ver con la astronomía. Por ejemplo, entre los asentamientos griegos del delta del Nilo y los de Crimea existía una variación apreciable en la cantidad de horas solares y la altitud del Sol respecto al horizonte. Por otro lado, la sombra que proyectaba la Tierra sobre la Luna en los eclipses lunares aparecía siempre en forma de disco. Uno de los primeros pensadores conocidos en afirmar que la Tierra era esférica parece que fue Pitágoras entre los siglos VI y V a.C., aunque probablemente hubo otros anteriores.

También dentro de la cultura griega encontramos las estimaciones más tempranas del tamaño de la Tierra de las que se tiene constancia. La primera de ellas se debe a Eratóstenes, cuya vida transcurrió mayormente en el siglo III a.C., y que llegó a ser el responsable de la biblioteca de Alejandría. Su cálculo de la circunferencia terrestre fue bastante riguroso gracias precisamente a los conocimientos preservados en dicha biblioteca. Se sabía que en la ciudad de Siena (actualmente Asuán), en el día y hora



en que el Sol alcanzaba su máxima altitud respecto al horizonte (mediodía del solsticio de verano), los objetos verticales no proyectaban sombra y la luz llegaba al fondo de los pozos. Considerando que el mediodía del solsticio ocurría simultáneamente en

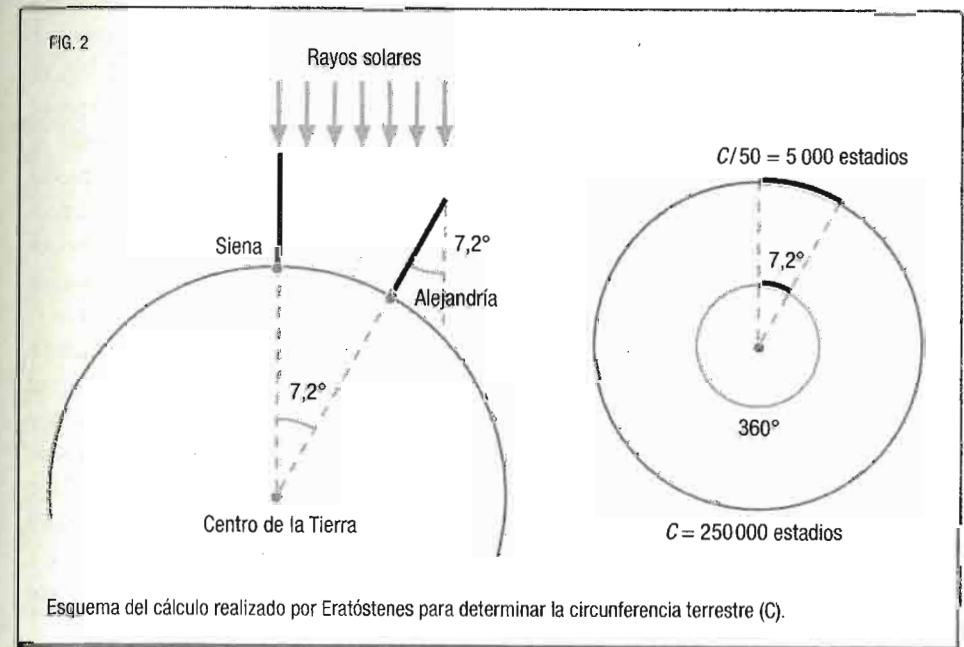
Eratóstenes no tenía más herramientas que palos, ojos, pies y cabeza y un gran deseo de experimentar. Con esas herramientas dedujo correctamente la circunferencia de la Tierra con una enorme precisión y un porcentaje de error mínimo.

CARL SAGAN

y Alejandría visto desde el centro de la Tierra. Esto suponía que el arco de circunferencia entre las dos ciudades era aproximadamente $1/50$ de la circunferencia terrestre total. Conociendo la distancia entre ambas, se podía conocer también la totalidad de esa circunferencia. Hay varias versiones acerca de cómo consiguió Eratóstenes la distancia entre Siena y Alejandría, pero en aquel entonces se disponía de diversas estimaciones gracias, sobre todo, a las caravanas de comerciantes. La distancia entre ambas ciudades que consideró fue de unos 5 000 estadios, lo que daba para la circunferencia de la Tierra unos 250 000 estadios. El estadio era una unidad de medida de longitud que, como era habitual en la antigüedad, no estaba perfectamente normalizada, pudiendo oscilar, según distintas versiones, entre 120 y 200 m. Aunque no está claro a qué valor del estadio se refería Eratóstenes, tomando la longitud del estadio de Olimpia de 174 m, se tiene para la circunferencia terrestre un valor de $43,5 \cdot 10^3$ km, ligeramente por encima de los $40 \cdot 10^3$ km considerados actualmente. Este último valor es un número entero, ya que en el siglo XVIII el metro se definiría originariamente como la diezmillonésima parte de un cuarto de circunferencia terrestre.

Siena y en Alejandría (su longitud es muy parecida) y que los rayos del Sol eran paralelos por encontrarse este a gran distancia de la Tierra, Eratóstenes ideó un método para medir la circunferencia terrestre (figura 2). Midió el ángulo de proyección de las sombras en Alejandría al mediodía del solsticio de verano, dando como resultado algo más de $7,2^\circ$. Aplicando los rudimentos de una incipiente trigonometría obtuvo que este ángulo era el mismo que existía entre Siena

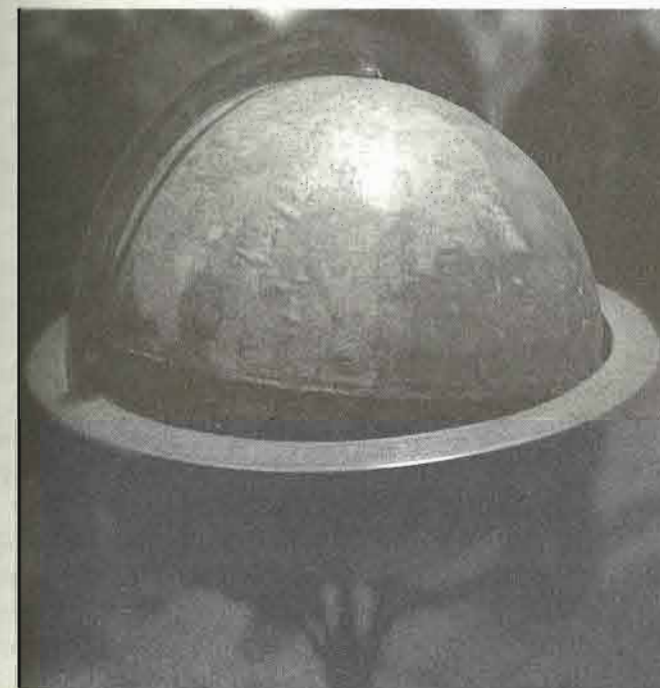
Aparte de haber estimado con bastante acierto el tamaño de la Tierra, los antiguos griegos habían establecido también nociones como la latitud y longitud. La latitud venía marcada por la elevación máxima del Sol en el cielo y la longitud era su perpendicular. Sus conocimientos geográficos abarcaban buena parte de Europa, África y Asia, que habían dividido en zonas tórridas, templadas y frías. Ya tenían, pues, el embrión de un modelo de geografía global, aunque les faltaba por conocer más del 95% de la superficie terrestre, incluyendo continentes enteros como América, Oceanía y la Antártida. Si bien todos los continentes, exceptuando la Antártida, estaban ya poblados desde hacía miles de años, ninguno de esos pueblos era consciente de la existencia de todos los demás. Aunque la llamada «ruta de la seda», la gran vía comercial entre Europa y China, se remonta hasta los albores de la historia, parece que nadie, o muy pocos, la había realizado por completo. Uno de los testimonios más interesantes al respecto es el libro del célebre mercader veneciano Mar-



co Polo (1254-1324) aparecido en el siglo xiii, en el que narra su viaje de ida y vuelta a China, donde permaneció durante años en la corte del emperador. Aunque algunos dudan de la completa veracidad de lo que se cuenta en el libro, lo cierto es que había un interés por ambas partes en comprender el mundo en su totalidad. En el siglo xv, tanto chinos como europeos, mayormente portugueses, habían intentado hacer la ruta entera por mar bordeando África. Los chinos se quedaron en la costa este africana, mientras que los portugueses llegaron hasta la India.

Un punto de inflexión para el desarrollo de un modelo completo de geografía global fue el descubrimiento del continente americano por parte de los europeos. Esto ocurrió en 1492 cuando Cristóbal Colón, al frente de una expedición española, intentaba llegar a las Indias navegando hacia el oeste. Pocas décadas después, ya en el siglo xvii, se produjo la primera expedición, la de Magallanes y Elcano, que dio la vuelta al mundo, quedando así demostrado que la Tierra tenía, efectivamente, forma esférica. A partir de ese momento aparecieron innumerables representaciones de globos terráneos y atlas (véanse las imágenes de la página contigua), que se fueron perfeccionando en los siglos siguientes. En los globos terráneos y atlas del siglo xvi solo estaban cartografiadas con precisión Europa, las costas africanas y parte de las asiáticas y americanas. Al principio la exploración del interior del continente americano fue llevada a cabo principalmente por españoles y portugueses, sobre todo en la parte sur. La parte norte fue explorada mayormente por ingleses y franceses. En cuanto a Oceanía, el descubrimiento por parte de los europeos es confuso; tanto españoles como portugueses ocultaban información para tener ventaja ante una posible ocupación de los nuevos territorios descubiertos. Finalmente, serían los holandeses e ingleses los que explorarían con detalle este continente en los siglos xvii y xviii. La Antártida no sería descubierta hasta el siglo xix.

Una de las consecuencias de aquellos viajes alrededor del mundo fue la aceptación de la esfericidad de la Tierra. A partir de ese momento, se fueron imponiendo los modelos en los que la Tierra era simplemente un planeta orbitando alrededor del Sol, que por otro lado ya existían desde la antigua Grecia. En



A la izquierda, imagen de la representación de un globo terráqueo más antigua conservada, realizada por Martin Behaim en 1492, antes de que Colón volviera de América. Arriba, mapa realizado por Abraham Ortelius como parte de *Theatrum Orbis Terrarum*, publicado en Amberes en 1570 y considerado el primer atlas moderno.

el desarrollo de estas teorías heliocéntricas, durante los siglos xvi y xvii, científicos como Copérnico, Galileo y Kepler tuvieron un papel fundamental. El globo terráqueo pasó a tener un eje de rotación inclinado respecto a su órbita planetaria alrededor del Sol. En ese «nuevo» globo se dibujaron unos círculos resultantes de cortar la superficie terrestre en planos perpendiculares al eje de rotación, los paralelos, los cuales marcan la latitud y tienen tamaño variable, siendo el máximo el ecuador. Se establecieron también los polos en los puntos en los que el eje de rotación cortaba la superficie terrestre y los semicírculos surgidos tras unir ambos polos se llamaron meridianos, referentes para marcar la longitud.

UN NUEVO MUNDO, UNA NUEVA CIENCIA

La exploración del globo terráqueo que siguió al primer viaje de Colón al «nuevo mundo» trajo consigo multitud de nuevos datos para cuyo análisis se necesitó el desarrollo de una nueva ciencia. Un claro ejemplo es la teoría de la gravedad de Newton, que surgió a finales de siglo xvii como broche de oro de las nuevas teorías astronómicas. Según esa teoría, los planetas giraban alrededor del Sol y los satélites alrededor de los planetas, atraídos por la misma fuerza que hacía caer los objetos al suelo en la superficie terrestre. Esta teoría entrañaba también la definición del concepto de masa como lo entendemos actualmente. Se trataba de una propiedad de los objetos que provocaba su mutua atracción. La fuerza de atracción que actuaba sobre dos objetos venía definida por sus masas, independientemente de su tamaño. Esta teoría servía tanto para pequeños objetos sobre la superficie terrestre como para planetas como la propia Tierra. Existía, sin embargo, una gran diferencia de escala entre ambos mundos, lo que hacía que se pudieran calcular solamente de forma separada las masas relativas de los pequeños objetos terrestres, por un lado, y las del Sol, los planetas y los satélites por el otro. Faltaba encontrar la relación de la masa de la Tierra con la de los objetos existentes sobre ella. El propio Newton su-

girió dos métodos para calcular esta relación. Uno consistía en medir la desviación de la plomada respecto de la vertical cerca de una montaña cuya masa se podía calcular y, el otro, en medir la fuerza de atracción entre dos masas conocidas separadas por una distancia conocida.

De los dos métodos propuestos por Newton para determinar la masa de la Tierra en relación a los objetos posados sobre ella, el segundo era el más preciso, pero también el de más difícil ejecución. No fue llevado a cabo con éxito hasta un siglo más tarde por el físico y químico británico Henry Cavendish (1731-1810), dando valores muy próximos a los actuales. De hecho, el valor que dio fue el de la densidad media de nuestro planeta, a partir de la cual se podía determinar su masa. El aparato usado constaba de una balanza de torsión extremadamente sensible aislada de las corrientes de aire y de los cambios de temperatura. La balanza contaba con un brazo horizontal de madera de cuyos extremos colgaban dos esferas de plomo idénticas. Contaba también con otras dos esferas de plomo de mayor tamaño cuya posición se podía fijar cerca de las pequeñas. El método consistía en fijar las esferas mayores y dejar girar el brazo. El ángulo de giro venía determinado por la resistencia a torsión de la balanza y por la atracción gravitatoria tanto de las esferas mayores como de la propia Tierra. Conociendo el ángulo y la resistencia, Cavendish efectuó los cálculos necesarios, obteniendo un valor para la densidad de la Tierra 5,4 veces el del agua. A partir de este valor se podía calcular también su masa, pues ya entonces se contaba con mediciones bastante precisas del tamaño terrestre; se sabía incluso que la Tierra estaba ligeramente achatada por los polos. Este hecho había sido ya predicho por Newton, si bien otros pensadores, como Descartes, creían justo lo contrario. Finalmente, se había discernido el asunto gracias a dos expediciones promovidas por la Academia de Ciencias de Francia para efectuar una serie de mediciones de arco de meridiano: una cerca del ecuador y la otra cerca de los polos.

Las expediciones por todo el planeta se fueron generalizando, fomentadas por el gran interés por los nuevos territorios exóticos, desde donde se generaron tanto relatos sobre sus pueblos

LA TEORÍA DE LA GRAVEDAD

Los primeros pasos para concretar la teoría de la gravedad fueron ya dados por el italiano Galileo Galilei (1564-1642). Una de las ideas más importantes que desarrolló fue la de la inercia. Actualmente diríamos que, si sobre un objeto no se realiza ninguna acción, ese cuerpo mantendrá su velocidad. En sus estudios sobre balística, Galileo describió la trayectoria curva de los proyectiles separando los componentes horizontal y vertical de la velocidad inicial con la que salían del cañón (figura 1). La velocidad horizontal se mantenía constante, mientras que la vertical sufría una aceleración constante debida a la fuerza de atracción terrestre. También llegó a la conclusión que esta aceleración no dependía de la masa de los cuerpos, de tal forma que una pluma y una bala tiradas desde lo alto de la Torre de Pisa tardarían, en ausencia de aire, lo mismo en llegar al suelo. Todas estas ideas fueron finalmente concretadas por el inglés Isaac Newton (1643-1727).

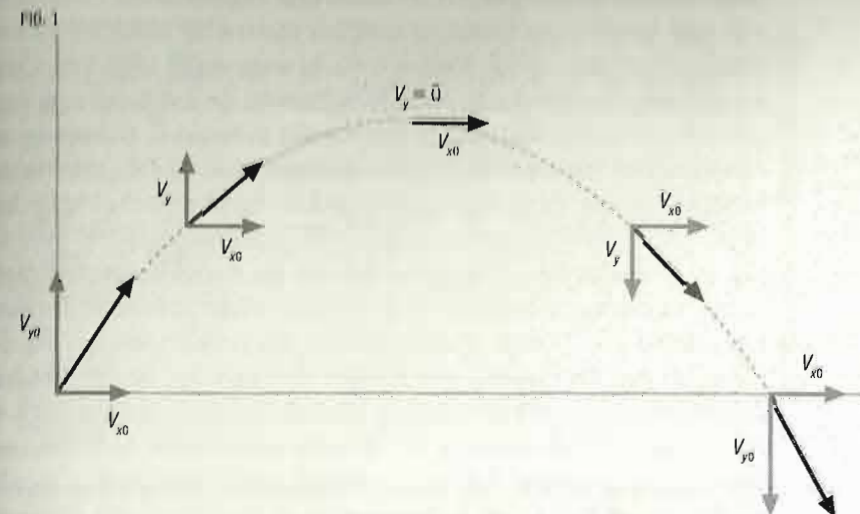
Las tres leyes de Newton

Una de las aportaciones más importantes de Newton fue la concreción de las tres leyes básicas sobre las que se sustenta la mecánica (el estudio del movimiento) y las fuerzas que lo producen:

- La primera ley es una expresión del concepto de inercia: «Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él».
- La segunda ley afirma que la aceleración experimentada por un cuerpo es proporcional a la fuerza que se le aplica: «El cambio de movimiento es directamente proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime».
- La tercera ley, la más famosa, señala que a toda acción corresponde una reacción: «Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: es decir, que las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto».

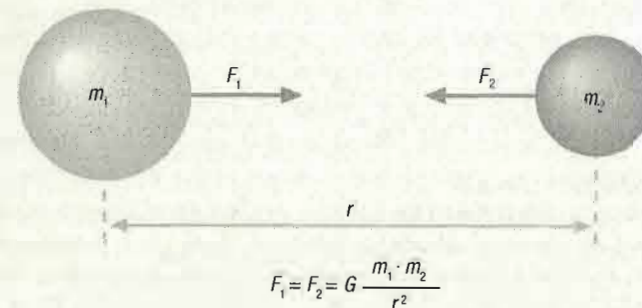
La ley de gravitación universal

Según la segunda ley de Newton, la fuerza de atracción que la Tierra produce sobre los cuerpos en su superficie es su peso. El peso de estos cuerpos es proporcional a su masa, ya que la aceleración que la fuerza de atracción terrestre produce sobre ellos es constante. Según la tercera ley, estos cuerpos atraen a la Tierra con la misma fuerza que su peso. Son los cuerpos los que caen al suelo y no la Tierra hacia ellos, ya que, al ser su masa mucho mayor, la aceleración que le causan es imperceptible. A partir de aquí, Newton definió la fuerza de atracción gravitatoria entre dos cuerpos como proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia (figura 2). Esta misma fuerza era la que mantenía a la Luna girando alrededor de la Tierra sin permitir que se escapase.



Esquema de la trayectoria de una bala lanzada con un cañón, donde se ve la velocidad descompuesta en una componente horizontal (V_x), que se mantiene constante, y una componente vertical (V_y) que disminuye hasta llegar a cero, mientras la bala sube y vuelve a aumentar mientras baja. Las componentes V_{x0} y V_{y0} corresponden a la velocidad inicial que lleva la bala al salir del cañón.

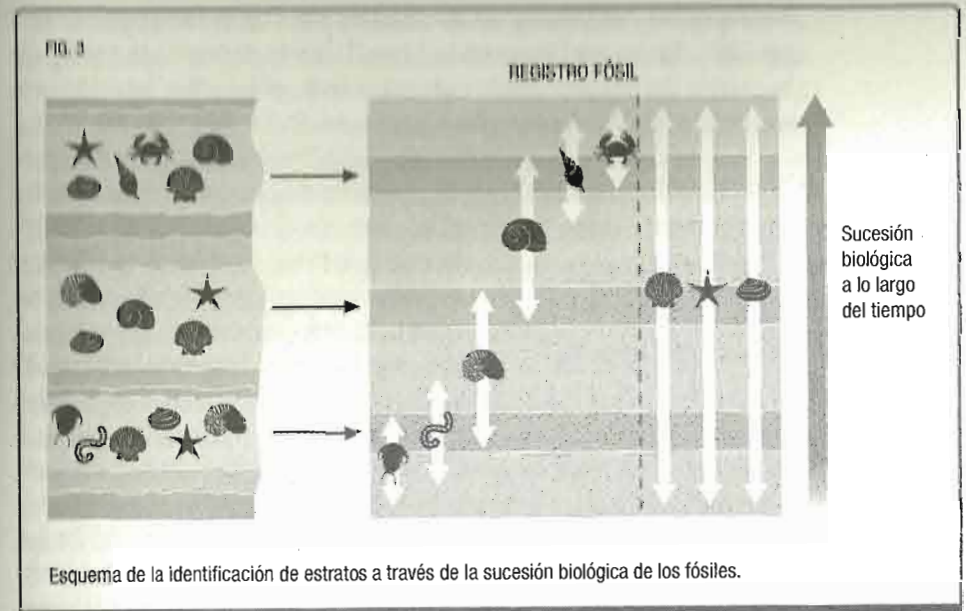
FIG. 2



Esquema de la fuerza de gravitación (F_1 y F_2) entre dos cuerpos, que es proporcional a sus masas (m_1 y m_2) e inversamente proporcional a su distancia (r). Esta proporcionalidad se convierte en igualdad aplicando la constante de gravitación universal (G).

y costumbres como descripciones de sus paisajes con sus especies de flora y fauna. Para catalogar todas las nuevas especies descubiertas se fue perfeccionando una clasificación científica, a la que también se incorporaron los fósiles de especies ya extintas. El estudio de los fósiles tuvo su auge en el siglo XVIII y XIX, ya que era de gran ayuda en la localización de los filones de carbón tan necesario durante la revolución industrial. El carbón se consumía en grandes cantidades en el proceso de fabricación de productos para el nuevo mercado global. La identificación de las vetas se convirtió en un tema esencial, y ello aumentó el interés por la geología. Se sabía entonces que las rocas aparecían divididas en planos o estratos, los cuales podían presentar formas muy complejas, con deformaciones y discontinuidades. Una de las primeras conclusiones a las que se llegó fue que se habían originado por superposición horizontal, deformándose con posterioridad y dando lugar a las grandes cordilleras montañosas. Los fósiles resultaban de gran utilidad para identificar y localizar los estratos, ya que daban cuenta de su estructura original. Es decir, los animales que se habían depositado en los estratos durante su formación eran distintos a lo largo del tiempo, por lo que existía una sucesión biológica (figura 3). En esta sucesión, había especies que variaban paulatinamente e incluso algunas que desaparecían casi instantáneamente.

Las primeras hipótesis para explicar las deformaciones geológicas y extinciones biológicas se basaron en la existencia de cambios repentinos y violentos. Con posterioridad aparecieron explicaciones más refinadas que apuntaban que esas deformaciones eran fruto de los mismos procesos naturales que, con la misma intensidad de antaño, actúan en el presente, principio que se conoce como «uniformismo». Uno de los libros más importantes en el que cristalizaron estas ideas fue *Principios de geología*, del abogado y geólogo británico Charles Lyell (1797-1875), publicado en tres volúmenes entre 1830 y 1833. Lyell, considerado el padre de la geología moderna, defendía mediante multitud de ejemplos ese uniformismo y el equilibrio dinámico mediante procesos de erosión y sedimentación. Aunque no estaba claro aún cuál era el origen de las deformaciones, una de las con-



secuencias del uniformismo era que la Tierra era mucho más antigua de lo que se había creído hasta entonces. Teniendo en cuenta el tiempo necesario para sedimentar todos los estratos conocidos, las estimaciones bíblicas de miles de años fueron sustituidas por otras de decenas de millones de años. La edad considerada actualmente, unos 4600 millones de años, se basa en la datación radiométrica desarrollada ya en el siglo XX.

El estudio de los fósiles abrió también la puerta a nuevas teorías en biología. El hecho de que en distintos tiempos hubiera habido distintas especies que habían ido cambiando dio lugar a varias teorías para explicar esta evolución. Según las teorías iniciales, las especies modificaban sus características para adaptarse a su entorno y esos cambios pasaban a su descendencia. Las teorías posteriores, más refinadas, explicaban la evolución como resultado de la selección natural. Es decir, solamente sobrevivían y se reproducían aquellos animales que, por sus características innatas, estaban mejor adaptados a su entorno. Uno de los libros más importantes donde cristalizaron estas ideas fue *El origen de*

las especies del británico Charles Darwin (1809-1882), publicado en 1859. En su archiconocido libro, Darwin defendía la teoría de la evolución por selección natural, siendo el hombre tan solo una especie más, evolucionada a partir de otras más primitivas. La

La incompatibilidad entre ciencia y religión es simplemente esta: un científico no creará nada hasta que lo vea; un hombre religioso no verá nada hasta que no crea en ello.

CHARLES LYELL

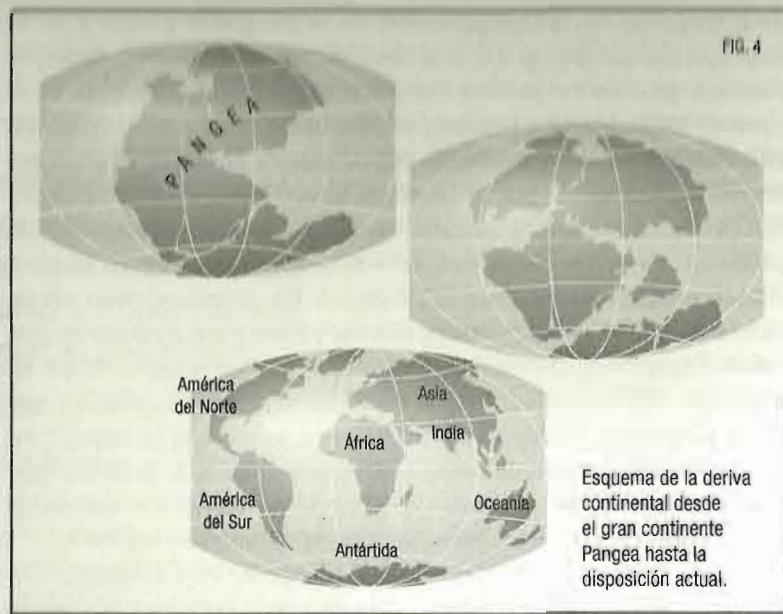
teoría de la evolución encontró mucha resistencia por parte de la Iglesia, al considerar que entraba en conflicto con la interpretación de la Biblia y con el carácter sagrado de la creación divina. Paradójicamente, en esos mismos años un monje germano llamado Gregor Mendel (1822-1884) estaba llevando a cabo unos experimentos con guisantes en la Abadía agustiniana de Santo Tomás de Brno, en la República Checa. Los cruces que hizo con distintas variedades de guisantes determinaron las leyes básicas de transmisión de caracteres de padres a hijos, los cuales llevaron al descubrimiento del ADN un siglo más tarde. Las posibles causas de las extinciones biológicas siguen actualmente en discusión.

EL INICIO DE LA GLOBALIZACIÓN: EXPLORACIÓN SIN FRONTERAS

Hoy en día sabemos que, combinando aviones y automóviles, podemos llegar a casi cualquier lugar del mundo en pocas horas o días. Esta facilidad para trasladarse alrededor del mundo no siempre ha existido. La revolución de los medios de transporte empezó ya en el siglo XIX, cuando los ferrocarriles se extendieron por todos los continentes y los barcos a vapor dejaron de depender solamente de los vientos. En la novela *La vuelta al mundo en ochenta días*, publicada inicialmente en capítulos en 1872, el escritor francés Julio Verne explica con detalle los medios de locomoción utilizados en aquel momento. Es una novela interesante desde muchos puntos de vista, también del científico, ya que da cuenta de ciertos fenómenos, entre ellos que al dar una vuelta a la Tierra en dirección este se vive un ciclo día-Sol de más. Esto da una idea del impacto que tuvo el desarrollo de los medios

de transporte en la comprensión de la geografía global y en la exploración de todos los rincones de nuestro planeta, aunque muchos de ellos no fueron visitados hasta el siglo XX. Este es el caso de las indómitas tierras polares, tanto en el Ártico como en la Antártida. Las dos primeras expediciones en llegar al polo sur fueron las lideradas por el noruego Roald Amundsen y el inglés Robert Scott, respectivamente, en 1918. La de Amundsen fue la primera, mientras que Scott, lamentablemente, falleció junto a cuatro compañeros durante el regreso. En cuanto al polo norte, existe una cierta controversia: si bien varias personas afirmaron haber llegado allí a principios del siglo XX, con posterioridad se supo que probablemente no fue así. La primera expedición que vio el polo norte de forma indiscutible la sobrevoló en zepelín en 1925; también estaba liderada por Amundsen. Y la primera que con seguridad puso los pies en él fue una expedición científica soviética liderada por el ruso Alexander Kuznetsov en 1948.

La revolución de los medios de transporte se intensificó durante el siglo XX haciendo que cada vez más procesos humanos tomaran una escala global. De forma paralela, también cada vez más procesos físicos de dimensión planetaria contaron con teorías globales que los explicaban adecuadamente, como por ejemplo la tectónica de placas. Ya en el siglo XIX se había descubierto una cadena montañosa en medio del océano Atlántico que posteriormente se reveló como parte de una red que se extendía por todos los océanos, como las costuras que surcan la superficie de un balón de fútbol. El paso decisivo hacia el modelo actual de las placas tectónicas llegó en 1912, con la teoría de la deriva continental planteada por el geofísico alemán Alfred Wegener (1880-1930). Esta teoría trata de explicar la coincidencia formal de las líneas de la costa de África y Europa con respecto a las de América. Después de analizar fósiles, rocas y estructuras geológicas de los distintos continentes, observando que había una similitud significativa, Wegener concluyó que se habían fragmentado de un gran continente, conocido como *Pangea* (figura 4). El movimiento de las masas continentales a lo largo del tiempo era el origen de las deformaciones que habían provocado la aparición de las grandes cadenas montañosas. El ejemplo más para-



Esquema de la deriva continental desde el gran continente Pangea hasta la disposición actual.

digmático, las del Himalaya y Karakórum, que habrían surgido al colisionar el subcontinente indio con el asiático. La teoría se fue perfeccionando en las décadas posteriores hasta encontrar los mecanismos concretos de su funcionamiento, como el de creación de corteza en las cadenas montañosas bajo los océanos, las llamadas dorsales oceánicas. Actualmente se sabe que las fuerzas que ponen en movimiento las placas son consecuencia de los movimientos convectivos de materia que se dan en el interior de la Tierra.

A día de hoy, gracias al desarrollo de las telecomunicaciones y a la puesta en órbita de multitud de satélites, tenemos un conocimiento muy detallado, casi instantáneo, de lo que ocurre sobre la superficie terrestre. Esto nos ha llevado a un entendimiento profundo de fenómenos que tienen dinámicas planetarias, como la estructura de la circulación atmosférica o las corrientes oceánicas. Todos estos conocimientos nos sirven para poder realizar, entre otras cosas, predicciones meteorológicas a corto plazo con bastante precisión. Por otro lado, la cartografía de la superficie

LOS SATÉLITES ARTIFICIALES

Al primer satélite artificial puesto en órbita en 1957 por la Unión Soviética, el Sputnik 1, le han sucedido multitud de satélites de otros países. Actualmente superan los dos mil y sus pesos oscilan entre menos de un kilogramo y más de una tonelada, siendo el mayor de ellos la Estación Espacial Internacional (ISS, por sus siglas en inglés). Para mantenerse en órbita alrededor de la Tierra necesitan alcanzar unas velocidades considerables. Mientras hace cinco siglos la expedición de Magallanes y Elcano tardó casi tres años en dar la primera vuelta al mundo, hoy en día la ISS da más de quince vueltas diarias al globo.

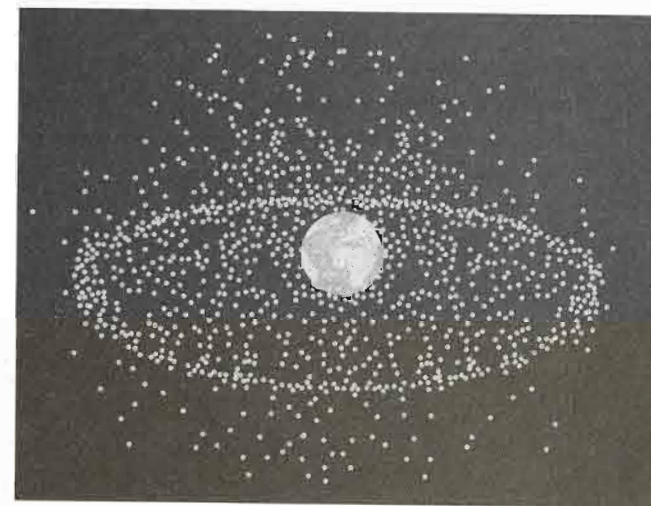
Órbita geoestacionaria

La velocidad que lleva un satélite no depende de su masa sino solamente de su posición en el campo gravitatorio terrestre, es decir, de su distancia a la Tierra. Por lo tanto, a cada órbita le corresponde un periodo concreto. Aquella órbita cuyo periodo coincide con el periodo de rotación terrestre es de especial interés, ya que un satélite situado en ella mantiene su posición relativa visto desde la Tierra. Esta órbita es la llamada *órbita geoestacionaria*.

Usos de los satélites

Los satélites tienen multitud de usos que van desde las telecomunicaciones hasta la observación espacial. Tienen también un papel importante en la cartografía y geolocalización, así como en la observación de las dinámicas planetarias, por ejemplo para realizar predicciones meteorológicas.

Esquema de la distribución de los satélites orbitando la Tierra. Se puede apreciar una mayor densidad de satélites formando un círculo que corresponde a la órbita geoestacionaria.



terrestre es cada vez más detallada y está al alcance de todo el mundo. Incluso disponemos de sistemas de geolocalización que nos pueden dar la posición exacta de un dispositivo diseñado a tal efecto. En el desarrollo de estas tecnologías durante las últimas décadas ha jugado un papel muy importante la informática. No solo en la coordinación del sistema de satélites que dan la posición de los dispositivos, sino también en la elaboración de la cartografía. El ejemplo más conocido puede que sea Google Maps, gracias al cual disponemos de una red de imágenes perfectamente acopladas tomadas por satélites, aviones y coches que, con más o menos detalle, cubren toda la superficie terrestre. En las próximas décadas, los drones están llamados a tener un importante papel en este sentido.

Finalmente, es preciso mencionar que en los últimos siglos el ser humano ha experimentado una explosión demográfica espectacular, sobre todo en el transcurso del siglo xx. Esto ha supuesto que la biomasa correspondiente al ser humano sea aproximadamente un 32% de la de los vertebrados terrestres, correspondiendo otro 65% a animales a su servicio, como vacas, ovejas o cerdos, y solo un 3% a animales salvajes. Hay que decir, sin embargo, que, en comparación con las estimaciones actuales de la biomasa total de la Tierra, el ser humano representa solamente un pequeño porcentaje. A pesar de eso, las consecuencias de su actividad pueden afectar las dinámicas planetarias. Afortunadamente, la conciencia humana está tomando también una dimensión planetaria. El último paso en este sentido ha sido internet, gracias a la que una información puede ser visualizada por millones de personas en pocos segundos. Esto es posible gracias a una amplia red, que incluye cables submarinos, millones de antenas locales y dispositivos móviles, la cual constituye una especie de sistema nervioso central de una nueva gran inteligencia colectiva.

Nuestro planeta y el universo

Hoy sabemos que la Tierra es un simple planeta que orbita alrededor del Sol, una entre una infinitud de estrellas que forman parte de una miríada de galaxias. Si bien el Sol es insignificante en el universo, muchas de las características de nuestro planeta se deben al lugar que ocupa en el sistema solar.

La importancia del Sol en los procesos terrestres es algo obvio: su presencia determina la diferencia entre el día y la noche. Además, la trayectoria que dibuja en el cielo nos señala la llegada de las estaciones. Cuando se acerca el invierno, por ejemplo, la trayectoria del Sol en el cielo es cada día más corta y su punto alto más próximo al horizonte. Ignorando las pequeñas variaciones estacionales, el Sol aparece, llega a su punto más alto y se esconde aproximadamente en las mismas direcciones, que usamos como referencias espaciales. Todas estas observaciones son casi inmediatas y ya eran conocidas por los primeros seres humanos. Cuando, en los albores de la historia, la población humana se asentó en núcleos de población agrícola, seguramente el interés por la astronomía creció, ya que resultaba útil para predecir con la máxima exactitud la llegada de las estaciones. Los modelos iniciales únicamente describían las trayectorias de los astros en relación a la Tierra, considerada como lugar central. Los modelos en que nuestro planeta giraba alrededor del Sol aparecieron ya en la antigua Grecia, aunque no fueron ampliamente aceptados hasta el siglo xvii.

En los modelos astronómicos actuales, la Tierra es solo el tercero de una serie de planetas que orbitan alrededor del Sol. Los

Nada existe excepto átomos
y espacio vacío; todo lo demás
son opiniones.

DEMÓCRITO

cuatro planetas más cercanos, Mercurio, Venus, la Tierra y Marte, son rocosos y constituyen el llamado sistema solar interior, siendo el nuestro el mayor y más masivo de ellos. Los otros cuatro planetas, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, constituyen el sistema solar exterior; son mucho mayores, gaseosos, más masivos y están repartidos en una región mucho más extensa. La proporción entre las órbitas de Marte y Neptuno, los

más alejados del sistema solar interior y exterior respectivamente, es la misma que entre un tapón de botella y una pizza familiar. La posición que ocupa nuestro planeta en el sistema solar ha posibilitado el desarrollo de

la vida, sin duda su característica distintiva más importante. En ello tiene un papel fundamental la radiación electromagnética solar, a cuyos rangos de frecuencia están perfectamente calibrados desde las células vegetales hasta nuestros receptores oculares. La cantidad de radiación recibida es decisiva, ya que determina la temperatura de nuestro planeta, posibilitando la presencia en superficie de grandes cantidades de agua líquida, esencial para la vida. Los planetas más cercanos reciben una radiación excesiva y los más lejanos una radiación insuficiente.

Al ser la Tierra una esfera, la radiación solar que llega a sus distintas partes presenta ángulos de incidencia diferentes. Donde llega de forma perpendicular, cerca del ecuador, la cantidad de radiación solar que incide sobre la superficie terrestre es máxima. Por otro lado, donde llega de forma tangencial, cerca de los polos, la radiación apenas incide sobre la superficie. En lo que respecta a las zonas intermedias, la cantidad de radiación es distinta según el ángulo con el que llega. Para un punto determinado de la superficie terrestre, el ángulo de incidencia varía diaria y anualmente. Tanto los días como los años dependen básicamente de los movimientos de nuestro planeta en el sistema solar. El día viene determinado por el movimiento de rotación sobre su propio eje, y el año, por el movimiento orbital alrededor del Sol. Actualmente contamos con numerosos modelos que describen con precisión todos estos movimientos.

ÉRASE UNA VEZ EL SISTEMA SOLAR

Los primeros modelos que dieron cuenta del movimiento del Sol, la Luna, los planetas y las estrellas, simplemente intentaban describir con precisión sus trayectorias relativas desde la óptica terrestre. Se trataba de modelos que consideraban que la Tierra estaba en el centro del universo. Ya en la antigua Grecia se especuló que la Tierra giraba sobre sí misma e incluso alrededor del Sol, si bien estas hipótesis no se aceptaron ampliamente hasta el siglo XVII, cuando la esfericidad de la Tierra fue un hecho demostrado y se pudieron dar los siguientes pasos. Los modelos heliocéntricos modernos se perfeccionaron e impusieron gracias a personajes como Copérnico, Kepler y Galileo. El broche de oro lo puso Newton con su teoría de la gravedad, según la cual la misma fuerza que hacía caer los pequeños objetos sobre la superficie terrestre era la que gobernaba el movimiento de los astros. Fue entonces cuando se empezó a usar el nombre de «sistema solar» y surgieron las primeras hipótesis sobre su formación. La que más ha perdurado con el paso del tiempo es la *hipótesis nebular*. Su idea principal es que el sistema solar se formó tras el colapso gravitatorio de lo que hoy llamamos *nube molecular*. Es decir, una extensa región en el interior de las galaxias con una densidad de materia suficientemente alta y una temperatura suficientemente baja para albergar moléculas de hidrógeno.

El modelo de sistema solar quedó configurado como lo conocemos en la actualidad cuando se descubrieron Urano y Neptuno, incorporándose a los seis planetas conocidos desde la antigüedad. Urano fue identificado en 1781 por el astrónomo inglés William Herschel. Las importantes perturbaciones en su órbita detectadas en las décadas siguientes llevaron a plantear la existencia de otro planeta. Neptuno se identificó por primera vez en 1846, exactamente en la posición calculada por el matemático francés Urbain Le Verrier, especializado en mecánica celeste, a partir de las perturbaciones de la órbita de Urano.

Respecto al lugar que ocupa el sistema solar en el universo, poco después del modelo de Copérnico apareció ya la idea del Sol como una simple estrella igual que las otras. En cuanto a la

Vía Láctea, ya en la Antigüedad se había sugerido que era un conglomerado de estrellas y hasta el siglo xx se creyó que era la única galaxia. En la década de 1920, gracias al estadounidense Edwin Hubble, se comprobó que era tan solo una entre muchas. Más aún, teniendo en cuenta el cambio en la frecuencia de la luz que nos llega desde ellas, se observó que la mayoría se alejaba a velocidades proporcionales a su distancia a la Tierra. Según la gran cantidad de datos recopilados en las últimas décadas, parece ser que la expansión del universo está incluso en fase de aceleración.

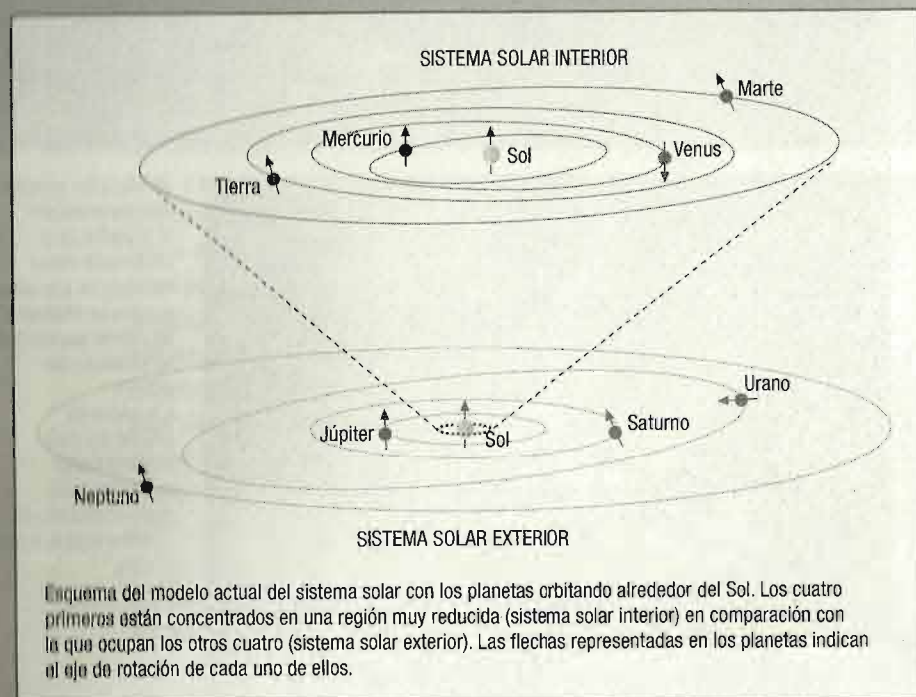
Según la datación radiométrica de ciertos meteoritos encontrados sobre la Tierra, se estima que el sistema solar tiene aproximadamente 4600 millones de años de antigüedad. Por otro lado, se cree que el colapso gravitatorio que desencadenó su origen tuvo que ver con una gran explosión estelar, lo que se conoce como supernova. Esto explicaría la presencia en la nube del pequeño porcentaje de elementos más masivos que el hidrógeno y el helio, que se pueden encontrar actualmente en los planetas. Estos elementos se habrían formado por fusión atómica en las estrellas previamente a su explosión supernova. Así, la explosión enriqueció la nube con elementos pesados. En todo caso, tras el colapso, la nube empezó a adoptar una forma aplanada y a girar cada vez más deprisa. La mayor parte de la masa fue a parar a la región central, donde la presión y la temperatura fueron aumentando hasta que los átomos de hidrógeno se empezaron a fusionar en átomos de helio. Estas reacciones de fusión contrarrestaron el colapso gravitatorio, llegando al equilibrio en el que se encuentra el Sol actualmente. El resto de la masa se aplanó aún más, dando lugar a un disco a partir del cual se formaron los planetas, los satélites y todos los demás pequeños cuerpos del sistema solar, representados en la imagen superior de la página contigua. Actualmente, esta teoría está apoyada por imágenes del proceso de formación de estrellas a partir de nubes moleculares e incluso de discos protoplanetarios en estrellas jóvenes (imagen inferior de la página contigua). Muchas de ellas han sido conseguidas por el telescopio espacial Hubble, puesto en órbita en 1990. En aquel entonces, el sistema solar era el único sistema planetario conocido. Actualmente, se conocen más de dos mil,



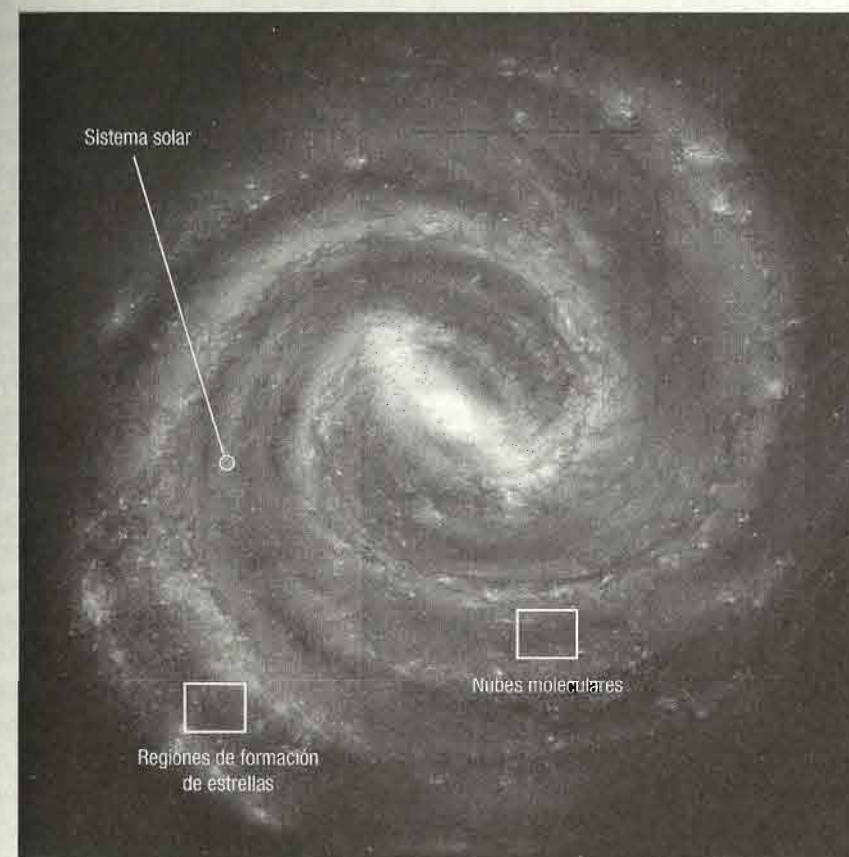
En la imagen superior está representado el esquema de la distribución actual estimada de pequeños cuerpos en relación a las órbitas planetarias del sistema solar exterior. A la izquierda, imagen del disco protoplanetario de HL Tauri visto desde el conjunto de radiotelescopios ALMA, en Chile.

EL CAMINO HASTA NUESTRO MODELO DEL SISTEMA SOLAR

Uno de los primeros modelos astronómicos del que se tiene constancia aparece en el tratado astronómico *Almagesto* (según su traducción al árabe) de Claudio Ptolomeo, escrito en la Alejandría romana del siglo II d.C., que recoge gran parte de la tradición griega. El modelo describía el movimiento de los astros con bastante precisión, pero necesitaba muchos trucos matemáticos no apoyados en ninguna hipótesis. Esto no se resolvió hasta principios del siglo XVI con las leyes del movimiento planetario del alemán Johannes Kepler, desarrolladas a partir del modelo heliocéntrico del polaco Nicolás Copérnico. Según este modelo, la Tierra giraba sobre sí misma cada día y completaba una vuelta al Sol cada año. Los demás planetas orbitaban también alrededor del Sol, siendo la Luna el único astro que lo hacía alrededor de la Tierra. El modelo quedó simplificado con las leyes de Kepler, que consideraban órbitas elípticas en lugar de circulares. Otro de los personajes destacados en la aceptación del heliocentrismo fue el italiano Galileo Galilei. Sus observaciones astronómicas demostraron que no todos los astros tenían que girar alrededor de la Tierra. Por ejemplo, identificó que Venus presentaba fases de luz y sombra como la Luna, con lo cual unas veces estaba delante y otras detrás del Sol. Esto implicaba que, al menos, este planeta sí orbitaba alrededor del Sol. También descubrió cuatro satélites



de Júpiter. Galileo los llamó, según su cercanía al planeta, Júpiter I, II, III y IV. El astrónomo Simon Marius los rebautizó años más tarde como hoy los conocemos: Ío, Europa, Ganimedes y Calisto. La figura de la página anterior muestra un esquema del sistema solar que ilustra el reducido espacio que ocupan los planetas rocosos (interiores) en comparación con los gigantes gaseosos. La imagen inferior es una representación de la Vía Láctea, en la que se indica el lugar que ocupa el sistema solar, en el brazo de Orión, también llamado brazo Local.



Esquema de la Vía Láctea incluyendo la ubicación del sistema solar.

cifra que aumenta con rapidez gracias a programas específicos de detección.

En cuanto a la formación de la Tierra, los demás planetas y sus mayores satélites, se cree que sucedió mediante acreción. Es decir, los granos de polvo del disco protoplanetario se fueron agrupando en entidades cada vez mayores, hasta llegar a cuerpos de pocos kilómetros que fueron incorporando cada vez más masa. Los planetas del sistema solar exterior acumularon mucha más masa al incorporar compuestos volátiles, como el metano, el amoníaco y el agua. Los planetas del sistema solar interior no pudieron incorporar estos compuestos volátiles, ya que en su región la temperatura era demasiado elevada. Por otro lado, la hipótesis nebular no puede explicar por sí sola las irregularidades en las órbitas y rotaciones de los planetas, que se deberían mayormente a impactos. En el caso de la Tierra, su eje de rotación inclinado podría haber sido causado por el choque de un cuerpo de alrededor de un 10% de su masa (un hipotético protoplaneta llamado Tea) en los estadios iniciales de su formación. Tea (o Theia) se habría formado en la misma órbita terrestre y se habría ido acercando hasta producirse una colisión tangencial. A consecuencia de ello, parte de su masa se habría fusionado con la Tierra, mientras que otra se habría aglutinado formando la Luna, lo cual explicaría su existencia, ya que es prácticamente el único satélite del sistema solar interior. Se cree que gran parte del agua y compuestos volátiles llegaron a la Tierra con posterioridad a ese impacto, traídos por pequeños cuerpos originados más allá de la órbita de Neptuno. Esto sucedió tras la formación de los planetas, cuando estos fueron ajustando sus órbitas. En algún momento se llegó a una resonancia 2:1 entre los periodos orbitales de Júpiter y Saturno (lo que significa que por cada dos vueltas que Júpiter daba al Sol, Saturno concluía una, mientras que hoy es de 5:2), lo que provocó una expansión de las órbitas de Urano y de Neptuno. Este último entró de lleno en una región altamente poblada por pequeños cuerpos con materiales volátiles, desviando algunos de ellos hacia el sistema solar interior en lo que se conoce como «bombardeo intenso tardío».

La suerte de la Tierra va íntimamente relacionada al futuro del Sol. Este se encuentra actualmente en una situación de estabilidad en la que la presión gravitatoria está compensada por las reacciones de fusión atómica que se dan en su interior. Esta situación durará hasta que empiece a escasear el hidrógeno, dentro de varios miles de millones de años. Esto sucederá inicialmente en el núcleo, continuando la fusión de hidrógeno solamente en la capa contigua. Cuando las reacciones de fusión en el núcleo dejen de contrarrestar la presión gravitatoria, la parte central empezará a contraerse y calentarse. Al mismo tiempo, las capas exteriores tenderán a expandirse y enfriarse, convirtiéndose el Sol en una gigante roja. Su radio aumentará un par de cientos de veces, y su luminosidad, un par de miles. Todo indica que entonces Mercurio y Venus serán absorbidos por el Sol. En cuanto a la Tierra, parece que el radio solar acabará superando su órbita actual, aunque también parece que su órbita será entonces mayor debido a la pérdida de masa de nuestra estrella. En cualquier caso, las condiciones para la vida habrán desaparecido de nuestro planeta antes de la fase de gigante roja. El Sol está actualmente aumentando su luminosidad y se calcula que, solamente en varios cientos de millones de años (los dinosaurios se extinguieron hace 65 millones de años), las temperaturas en la superficie terrestre habrán aumentado hasta hacer inviable la vida. Quizá pueda persistir algún tiempo en los fondos de los océanos, que terminarán desapareciendo también, al igual que la atmósfera.

EN EL CENTRO, EL SOL

Tanto por su masa como por su capacidad de generar energía, el Sol ocupa el lugar central en el sistema que lleva su nombre. Su radio, de $696 \cdot 10^3$ km, es unas cien veces mayor que el de la Tierra, que orbita a su alrededor a una distancia media de $150 \cdot 10^6$ km. Si la Tierra fuera una canica con un diámetro de 13 mm, entonces el Sol sería una esfera con un diámetro de 1,4 m, situada a unos 150 m de distancia. La densidad media solar es de $1,4 \text{ kg/dm}^3$, algo más de un cuarto de la terrestre. Teniendo en cuenta que

está formado por un 74,9% de hidrógeno y un 23,8% de helio, los dos elementos con una menor masa atómica, su densidad es relativamente alta, algo mayor que la del agua. Esto se debe a que en el interior del Sol ambos elementos están sometidos a elevadísimas presiones, resultado de la gran concentración de masa. Esta concentración no colapsa gravitatoriamente, ya que está contrarrestada por las reacciones de fusión de átomos de hidrógeno en átomos de helio que ocurren en el núcleo solar. Concretamente, a cada segundo que pasa cientos de millones de toneladas de hidrógeno se convierten en helio, un proceso durante el cual millones de toneladas de materia se transforman en energía. Parte de esta energía acaba siendo irradiada en forma de partículas con carga eléctrica y ondas electromagnéticas. El pequeño porcentaje que llega a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas ha permitido el desarrollo de la vida tal como la conocemos.

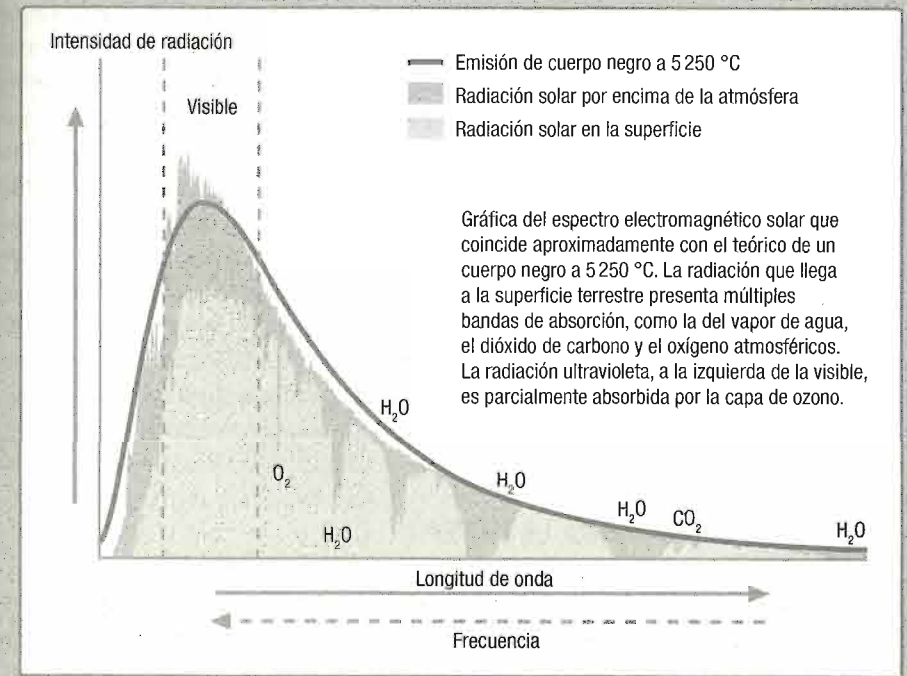
La radiación electromagnética solar ha sido y es hasta tal punto esencial para la vida en la Tierra que ha marcado profundamente su desarrollo. Desde las células vegetales hasta nuestros receptores oculares están perfectamente calibrados para aprovechar el rango de frecuencias que el Sol irradia con más intensidad, entre ellas la luz. Esta radiación es la principal fuente de energía de los organismos autótrofos, que obtienen su energía directamente a través de compuestos inorgánicos, y pasa al resto a través de la cadena trófica. Por ejemplo, la energía que obtienen las plantas mediante el proceso de fotosíntesis pasa a través de la cadena alimentaria a los herbívoros, a los carnívoros y al ser humano. Aunque sin radiación solar la vida como la conocemos no existiría, no toda la radiación es beneficiosa. De hecho, la vida en la superficie terrestre es posible gracias a la capa de ozono, que absorbe parte de la radiación con mayor frecuencia que la luz. Por otro lado, la radiación solar es también la responsable de la temperatura en la atmósfera terrestre y, en última instancia, de las dinámicas atmosféricas. Cuando la luz incide sobre los objetos, estos absorben parte de su energía en forma de calor, calentando su entorno inmediato. El calentamiento diferencial de las distintas partes de la superficie terrestre acaba provocando la evaporación de agua y movimientos de aire que

LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA SOLAR

De acuerdo con la teoría de radiación del cuerpo negro, todos los cuerpos emiten ondas electromagnéticas en distintas frecuencias. Las frecuencias emitidas con máxima intensidad dependen de la temperatura del cuerpo.

El espectro electromagnético solar

En el caso del Sol, el espectro de ondas electromagnéticas coincide aproximadamente con el descrito por la teoría para un cuerpo a 5250 °C. Las frecuencias emitidas con máxima intensidad son las que puede percibir el ojo humano, conocidas como «luz». De hecho, toda la vida en la Tierra está adaptada al rango de frecuencias de la radiación solar. El Sol también emite radiación en otras frecuencias distintas a las de la luz, aunque con menor intensidad. La radiación ultravioleta, de mayor frecuencia y menor longitud de onda que la luz, es potencialmente peligrosa, pues afecta a la integridad molecular. Por suerte, es absorbida en parte por la capa de ozono, lo que posibilita la vida en la Tierra. La radiación infrarroja, de menor frecuencia y mayor longitud de onda, interactúa con las moléculas, aumenta su velocidad y genera calor. Tras rebotar en los cuerpos, la radiación puede perder frecuencia, por lo que parte de la radiación ultravioleta y visible que nos llega del Sol acaba convertida en infrarroja, generando calor.



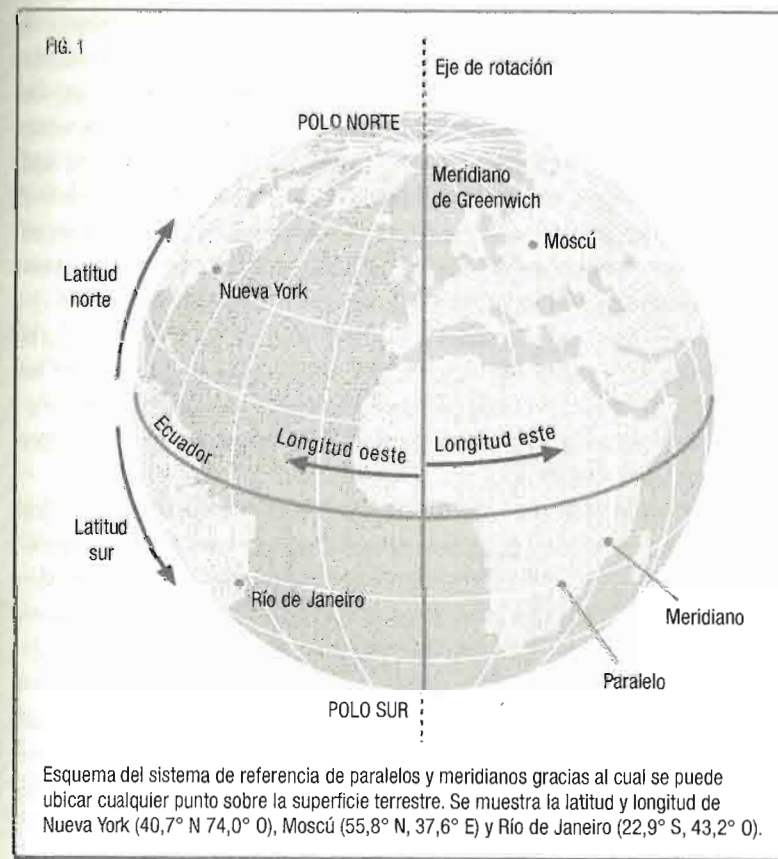
determinan el clima y, parcialmente, la geología a través de la erosión. Las energías renovables propias de esta dinámica, como la hidroeléctrica y la eólica, han sido aprovechadas por el ser humano desde hace siglos. De hecho, incluso la energía de los combustibles fósiles es energía solar acumulada.

Además de las ondas electromagnéticas, el Sol emite constantemente un flujo de partículas cargadas eléctricamente que constituyen el llamado *viento solar*. Este flujo es el responsable de las auroras boreales y australes que podemos ver ocasionalmente en los polos magnéticos de nuestro planeta, ya que el resto de la superficie está protegida por el campo magnético terrestre, la magnetosfera. Se trata básicamente de electrones, protones y trazas de núcleos de helio, que consiguen escapar de la gravedad solar por su elevada velocidad. Sin el viento solar, el campo magnético del Sol no se extendería mucho más allá de la dinámica superficial. El campo magnético solar, generado por corrientes de convección en la capa inferior a la superficie, tiende a ordenar el gas superficial siguiendo sus líneas de fuerza. Este orden se ve distorsionado al rotar la superficie solar más deprisa en el ecuador que en los polos. Para restablecer el equilibrio, se producen rupturas ocasionales en la continuidad del campo, que se manifiestan en forma de las conocidas manchas solares acompañadas de erupciones. El desequilibrio y las rupturas van aumentando hasta llegar a una fase de máximo desorden, conocida como *máximo solar*. Este fenómeno sucede aproximadamente cada once años y termina con un cambio de polaridad. En los máximos solares aumentan el número y la intensidad de manchas solares y las erupciones, que pueden afectar temporalmente a la magnetosfera terrestre provocando lo que se conoce como *tormenta solar*.

UN LUGAR ÚNICO: LA TIERRA

Muchas de las características de nuestro planeta vienen dadas por el lugar que ocupa en el sistema solar y por sus movimientos respecto al Sol. Su movimiento de rotación, por ejemplo, es el causante del día y la noche, o sea de la exposición y de la no ex-

posición a la luz solar de un punto concreto de su superficie. La palabra «día» acostumbra a usarse también como medida temporal refiriéndose a un ciclo medio día-noche terrestre, siendo una hora su veinticuatroava parte. Visto desde la Tierra, el Sol presenta un desplazamiento relativo de 15° cada hora, lo que sirvió originariamente para definir el concepto de «este» u «oeste» como la dirección desde o hacia dónde se desplaza respectivamente. Para determinar cuán al este o al oeste se encuentra un punto, se usa el concepto de «longitud». A tal efecto, se considera la superficie terrestre delimitada por semicírculos llamados «meridianos» (figura 1), que unen los dos puntos en los que es

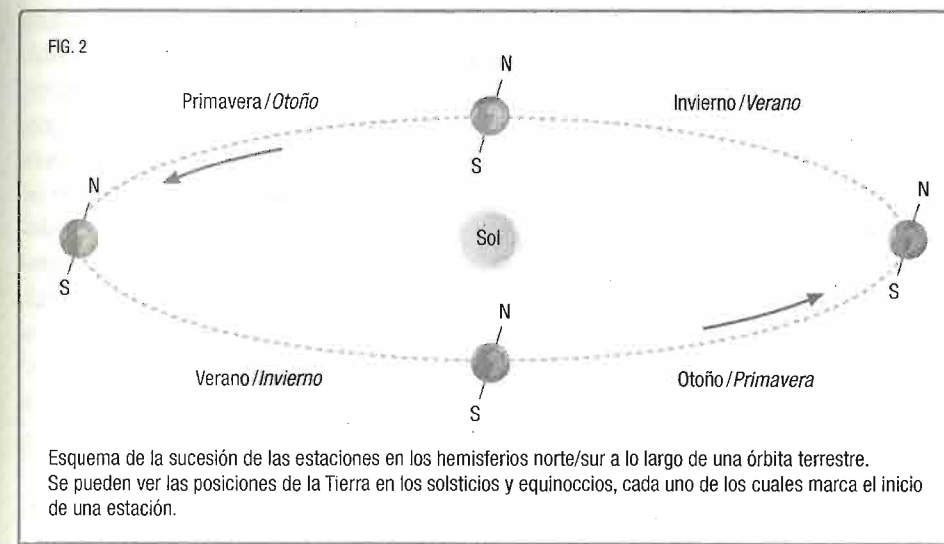


cortada por el eje de rotación, conocidos como «polos geográficos» o simplemente «polos». El sistema de meridianos toma su origen en el meridiano de Greenwich (municipio próximo a Londres), establecido en el siglo XIX cuando los británicos aún dominaban el comercio marítimo mundial. Para dar la posición de un meridiano se da el ángulo respecto al meridiano de Greenwich visto desde el eje terrestre. Este puede ser de 0° a 180° de longitud acompañado de E (este) u O (oeste), según donde esté situado. Por cada 15° de longitud E el mediodía solar tiene lugar una hora más temprano y por cada 15° de longitud O, una hora más tarde. El meridiano que completa el círculo del de Greenwich tiene una longitud de 180° E o 180° O, según se mire, y constituye la línea de cambio del día. Por otro lado, para poder referirse a puntos sobre la superficie terrestre, se necesita otro sistema de referencia que dé la posición sobre los meridianos. Para ello se delimita la superficie terrestre mediante unos círculos llamados «paralelos» (figura 1), cuyos planos son perpendiculares al eje de rotación. Tienen tamaño variable, siendo el máximo el del ecuador, equidistante entre ambos polos. Para diferenciarlos, el polo norte o sur es el que está a la izquierda o a la derecha respectivamente cuando miramos al este desde cualquier punto de la Tierra. Se dice que el ecuador tiene 0° de latitud, magnitud que va aumentando hasta 90° de latitud en los polos. La latitud se acompaña de N (norte) o S (sur) según qué polo esté más cerca. Este mismo criterio nos sirve para dividir la superficie terrestre en sendos «hemisferios».

En cuanto al movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, el tiempo que tarda nuestro planeta en completar una órbita entera es lo que llamamos un «año astronómico», que podemos percibir por las distintas posiciones relativas de las estrellas en el cielo nocturno. El año astronómico tiene una duración de 365,26 días, que no corresponde con un número entero. Para que las fechas de nuestro calendario no se atrasen con respecto al año astronómico, cada cuatro años, en los llamados años bisiestos, se añade un día extra al calendario (29 de febrero). Así pues, los años normales tienen 365 días y los bisiestos 366. Existen otras normas más refinadas para acabar de ajustar los decima-

les, no siendo bisiestos aquellos años que son divisibles entre cien y no divisibles entre cuatrocientos. Cuestiones de calendario aparte, el año nos pasaría totalmente inadvertido a simple vista si no fuera por las estaciones, que son consecuencia de la inclinación de $23,3^\circ$ que tiene el eje de rotación de la Tierra con respecto a su plano orbital. Este eje se mantiene prácticamente en la misma dirección con respecto a las estrellas con lo que el año tropical, definido por las estaciones, coincide con bastante exactitud con el año astronómico.

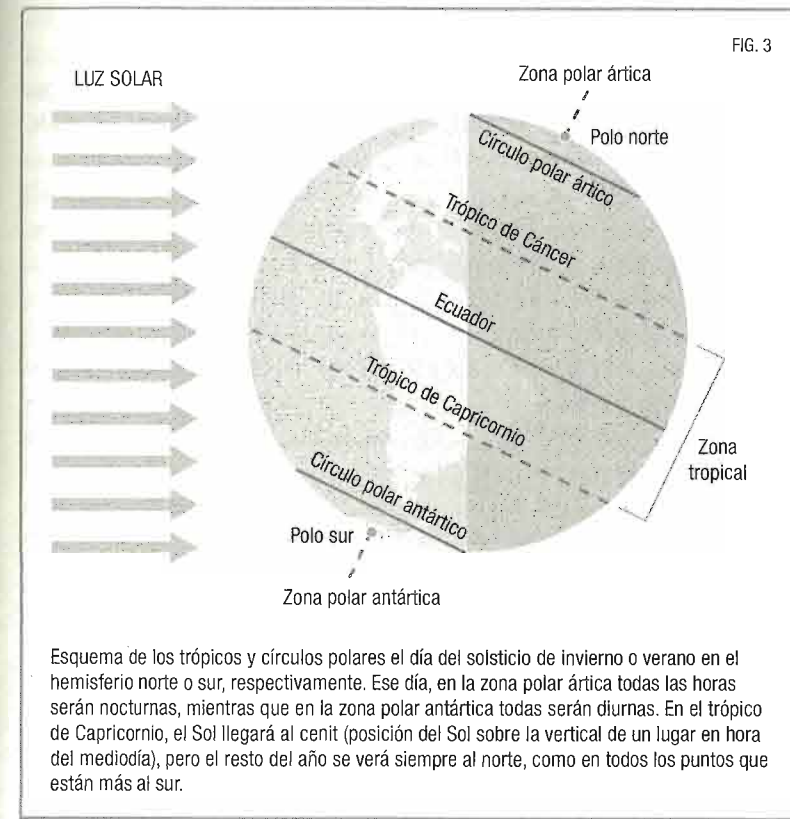
La relación existente entre la inclinación del eje de rotación terrestre y las estaciones tiene que ver con la variación que supone en el tiempo y ángulo de incidencia de la radiación solar. El eje de rotación mantiene su inclinación esencialmente constante respecto a las estrellas, variando respecto al Sol a lo largo de la órbita y causando así una distinta repartición de las horas diurnas y nocturnas (figura 2). El eje de rotación solamente coincide dos veces al año con el plano del terminador solar (el círculo que delimita la parte iluminada de la Tierra), en lo que se llama *equinoccios*. En los días a su alrededor, las horas diurnas y nocturnas están repartidas equitativamente en todos los puntos de la



Tierra. Tomando como límite estos dos eventos, el año se puede separar en dos mitades, en cada una de las cuales uno de los hemisferios tiene más horas diurnas que nocturnas, y viceversa. La diferencia máxima entre horas diurnas y nocturnas se produce cuando el eje de rotación alcanza la máxima inclinación respecto al plano del terminador solar, en lo que se llama *solsticios*. El solsticio de verano corresponde al máximo de horas diurnas y el de invierno al mínimo de horas diurnas. En cuanto a los equinoccios, en el de otoño las horas diurnas están disminuyendo y en el de primavera, aumentando. Estos cuatro eventos marcan el inicio de sendas estaciones. En el hemisferio norte, el solsticio de verano es el 21 de junio, y el de invierno, el 21 de diciembre; el equinoccio de otoño es el 23 de septiembre, y el de primavera, el 20 de marzo. En el hemisferio sur tanto las fechas de los solsticios como las de los equinoccios se intercambian.

La variación del reparto de horas diurnas y nocturnas es más acusado cuanto más cerca de los polos y lejos del ecuador (figura 3). Alrededor de los polos existen unas zonas en que todas las horas son diurnas u nocturnas, dependiendo de la estación, ya que la rotación completa de cada punto queda al mismo lado del terminador solar. La extensión máxima de estas zonas, llamadas polares, coincide con los solsticios y viene delimitada por los círculos polares ártico y antártico, cuyas latitudes son $66,5^\circ$ N y $66,5^\circ$ S, respectivamente. En los puntos situados en los círculos polares, los únicos días en que todas las horas son diurnas o nocturnas son los del solsticio, en los cuales la luz solar incide puntualmente de forma tangencial, pero sin que el Sol llegue a esconderse o a sobresalir del horizonte. Por otro lado, en el ecuador las horas diurnas y nocturnas están siempre repartidas equitativamente, ya que siempre queda dividido en dos partes iguales por el terminador solar, el cual describe dos círculos máximos sobre la superficie terrestre. Existe alrededor del ecuador una zona en la que a lo largo del año la luz solar llega de forma perpendicular en algún momento del día. Es la llamada zona tropical y viene delimitada por los trópicos de Cáncer y Capricornio, cuyas latitudes son $23,3^\circ$ N y $23,3^\circ$ S, respectivamente. En el exterior de la zona tropical la luz solar nunca llega en

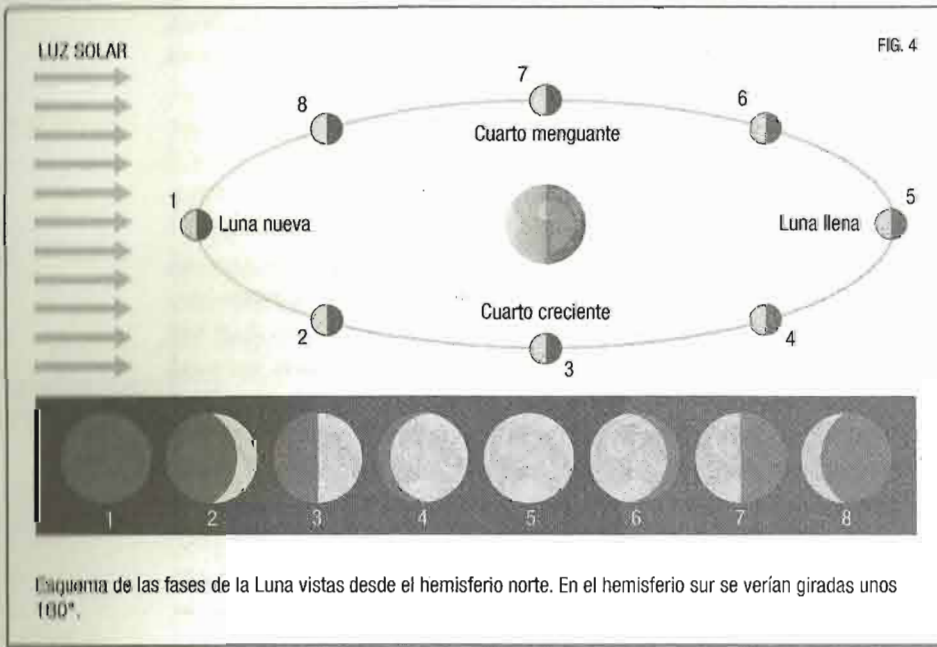
perpendicular, pues la posición del Sol en el cielo se encuentra siempre o en el sur o en el norte, dependiendo del hemisferio. En los puntos situados en los trópicos, la luz solar llega de forma perpendicular únicamente una vez durante el día del solsticio de verano. Por último, la variación de la temperatura en las distintas estaciones no solo depende del mayor o menor número de horas diurnas, sino que se ve aumentada por el ángulo de incidencia de la radiación solar. Cuanto más perpendicular sea respecto a la superficie, mayor es la cantidad de radiación. Cada hemisferio recibe, pues, una mayor cantidad de radiación en la parte del año en que tiene más horas diurnas, es decir, en primavera y verano.



LA LUNA, INFLUENCIA CLAVE

La Luna es el único satélite de la Tierra y casi el único del sistema solar interior, exceptuando dos cuerpos menores que orbitan alrededor de Marte. Se mueve en órbita alrededor de nuestro planeta a una distancia media de unos $384 \cdot 10^3$ km. El ciclo lunar que percibimos desde la Tierra es de 29,5 días, aunque su periodo orbital relativo a las estrellas es de 27,3 días. Esto es debido a que el movimiento de la Tierra alrededor del Sol influye en nuestra percepción. Por otro lado, el periodo de rotación de la Luna sobre su propio eje está perfectamente sincronizado con el de su órbita alrededor de la Tierra, de tal forma que siempre nos presenta la misma cara. Una cara que solo podemos ver total o parcialmente iluminada gracias a la luz solar.

Las fases de luz y sombras que vemos en la Luna se deben a su posición relativa, que cambia durante su periodo orbital (figura 4). Cuando está entre la Tierra y el Sol, no aparece en el cielo



nocturno, y se conoce como «luna nueva», mientras que, cuando se encuentra en el lado opuesto, la vemos totalmente iluminada, y la denominamos «luna llena». Entre la luna nueva y la luna llena existe una fase en la que nuestro satélite va apareciendo cada día más horas en el cielo nocturno, y la parte iluminada visible desde la Tierra crece («luna creciente»). Ocurre lo mismo, de forma inversa, entre la luna llena y la luna nueva («luna menguante»). Cuando vemos justamente la mitad de la Luna iluminada, se conoce como «cuarto creciente» o «menguante», según la fase en la que se encuentre. Desde tiempos prehistóricos, el ciclo lunar ha servido al hombre como referencia temporal intermedia entre el día y el año. Su duración total se aproxima a un mes y el tiempo entre luna nueva o llena y cada uno de los cuartos es de más o menos una semana. Un fenómeno particular que puede ocurrir los días de luna llena y nueva son los eclipses, que tienen lugar cuando la órbita inclinada de la Luna permite que se alinee con el Sol y la Tierra. Los eclipses lunares tienen lugar en las noches de luna llena, cuando la sombra de la Tierra se proyecta sobre nuestro satélite. Los eclipses solares tienen lugar en los días de luna nueva, cuando esta se encuentra entre la Tierra y el Sol e impide la visión de este último desde ciertas partes de nuestro planeta.

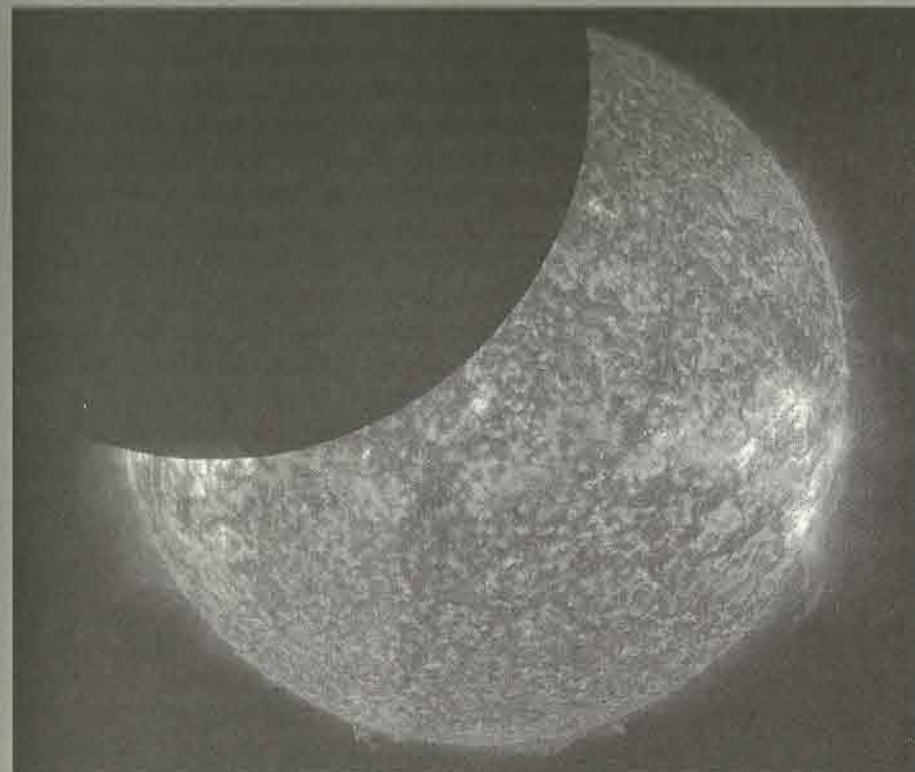
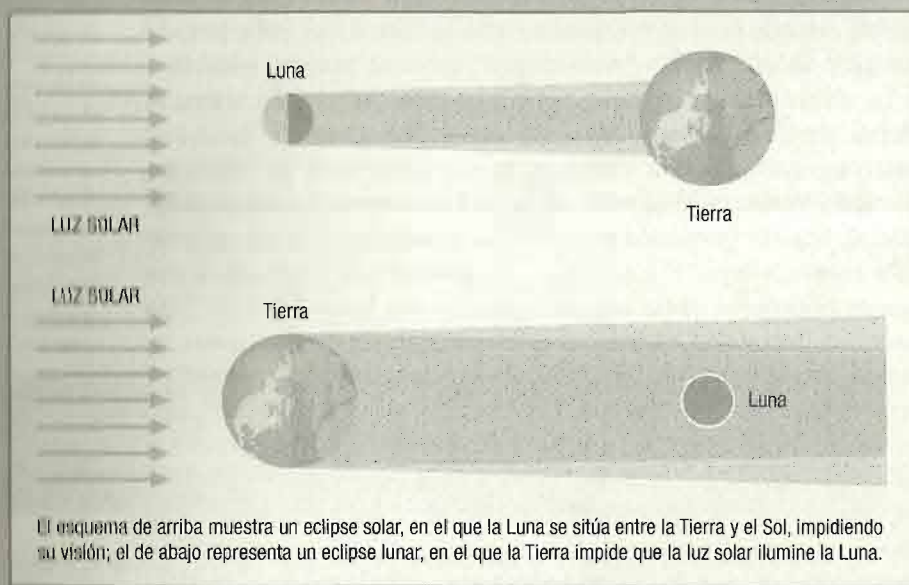
La existencia de la Luna tiene una gran influencia sobre la Tierra desde muchos puntos de vista. Por ejemplo, las fases lunares pueden alterar ligeramente los biorritmos de los seres vivos. En nuestras ciudades, con una importante iluminación artificial, apenas podemos percibir los cambios entre los días de luna nueva y llena. Sin embargo, alejándonos a zonas poco pobladas podremos observar que, mientras en las noches de luna nueva la oscuridad es casi total, en las noches de luna llena se puede ver con bastante claridad. Este hecho influye en muchos organismos vivos, altamente dependientes de la luz solar, que pueden adaptar sus ciclos al lunar. Sin ir más lejos, la duración del ciclo de la ovulación en la mujer y en las hembras de otras especies coincide aproximadamente con la del ciclo lunar. Hay que decir también que existe mucha superstición respecto a los ciclos lunares, por lo que debemos ser cautelosos ante toda la información al respecto.

ECLIPSES: CUANDO LA LUZ DE UN CUERPO CELESTE ES BLOQUEADA POR OTRO

Los eclipses (del griego *ekleipsis*, que significa «desaparición») se dan cuando la Tierra se alinea con el Sol y la Luna. Existen dos tipos: el lunar, que se produce cuando la Luna se encuentra atravesando la sombra de la Tierra, y el solar, que tiene lugar cuando la Luna se sitúa entre nuestro planeta y el Sol, impidiendo su visión. En los eclipses lunares, la sombra que proyecta nuestro planeta cubre total o parcialmente la Luna, dependiendo de su posición. Los observadores que se encuentran en la mitad del planeta desde la que la Luna es visible durante el eclipse, lo verán de forma muy similar. En los eclipses solares, la sombra que proyecta la Luna sobre la Tierra solo abarca una parte de la superficie terrestre. Es por eso que solo pueden verse en franjas concretas, que varían en cada ocasión. Los observadores verán un eclipse total o parcial, dependiendo de su posición en la superficie terrestre.

Inclinación del plano lunar y frecuencia de los eclipses

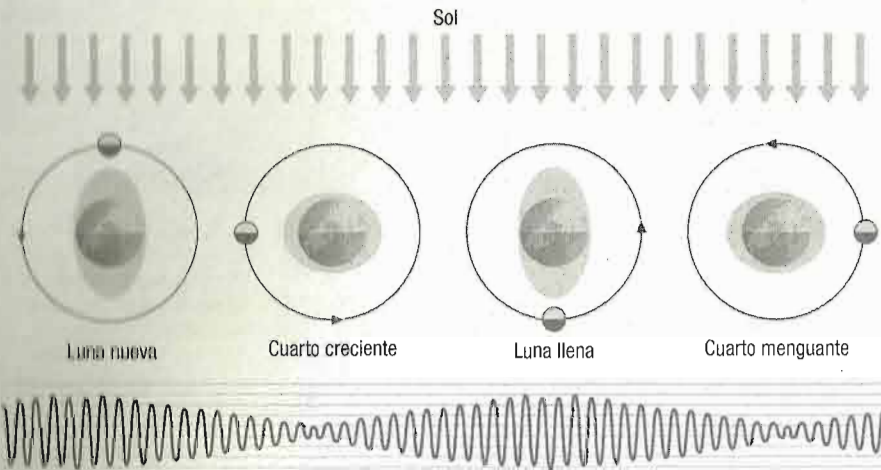
Si un eclipse consiste en la alineación de la Tierra con el Sol y la Luna, entonces uno se puede preguntar por qué no sucede cada dos semanas, coincidiendo con la luna nueva (solar) y la luna llena (lunar). La respuesta a esa pregunta es porque la órbita lunar está inclinada $5,1^\circ$ respecto a la de la Tierra alrededor del Sol. Al existir esta inclinación, la alineación de los tres astros solamente se puede producir durante dos periodos al año, cuando la línea de intersección de los planos de ambas órbitas pasa por el Sol. Esta es aproximadamente la frecuencia con la que se dan los dos tipos de eclipses.



Arriba, la Luna transitando por delante del Sol. La imagen fue captada por el Solar Dynamics Observatory (SDO), telescopio espacial de la NASA cuyo cometido es el estudio de nuestra estrella. En la imagen de la izquierda, tomada desde la Estación Espacial Internacional, se contempla la mancha que proyecta la Luna sobre la superficie terrestre. Los habitantes de esta región de la Tierra están observando un eclipse solar.

Desde un punto de vista gravitatorio, la influencia de la Luna sobre nuestro planeta es también importante. Su masa es algo más del 1% de la terrestre, siendo el satélite más masivo en relación con su planeta de todo el sistema solar. La cuestión es que la fuerza de la gravedad entre la Tierra y la Luna actúa de forma diferencial sobre sus distintas partes, siendo mayor en aquellas más cercanas que en las más alejadas, lo que provoca en ellas una deformación. A causa de la atracción gravitatoria diferencial que ejerce la Tierra sobre la Luna, esta siempre nos presenta la misma cara. Y a consecuencia de la atracción gravitatoria diferencial que ejerce la Luna sobre la Tierra, se produce una gran deformación en los océanos, que forman un esferoide cuyo eje mayor pasa por nuestro satélite. Cada día, al dar la vuelta sobre sí misma, la Tierra atraviesa, pues, dos zonas de marea alta (pleamar) y dos de marea baja (bajamar), aunque en determinados puntos costeros puede que solamente se perciba una (figura 5). Las mareas pue-

FIG. 5



Esquema que muestra la correspondencia entre las fases lunares y las variaciones de altura en el nivel del mar. Cada día, al dar la vuelta sobre sí misma, la Tierra atraviesa dos zonas de marea alta y dos de marea baja. Cuando la Luna y la Tierra están alineadas con el Sol la variación es mayor.



Imágenes de la marea baja y la marea alta en el Monte Saint-Michel, en el noroeste de Francia.

den verse acentuadas o mitigadas por la influencia gravitatoria solar. Aunque la gravedad del Sol es mucho más intensa, las fuerzas de marea provocadas por la Luna son más importantes, por estar más cerca y ser su atracción gravitatoria diferencial más pronunciada. Así pues, si la Luna y la Tierra están alineadas con el Sol, el esferoide es más alargado que si no lo están. Esto se traduce en que, durante las fases de luna nueva y llena, con los tres astros alineados, las variaciones de altura en el nivel del mar son más acusadas.

La superficie terrestre

La diferencia entre la altura máxima y la mínima en la superficie terrestre es del orden de veinte kilómetros. Si la Tierra fuera del tamaño de una naranja, los desniveles en su superficie no alcanzarían el grosor de una uña. Puede parecer insignificante desde la perspectiva planetaria, pero es considerable desde el punto de vista humano.

Gracias a los satélites artificiales hemos mejorado notablemente nuestro conocimiento de la superficie terrestre, pudiendo reproducir su relieve con asombrosa exactitud. Una de nuestras principales dificultades sigue siendo cómo trasladar esa información a un plano. Representar la superficie terrestre en un plano no es sencillo, ya que se trata de una superficie esférica tridimensional. Es como intentar aplanar una piel de naranja: por mucho que lo intentemos siempre persisten las ondulaciones. De hecho, en las superficies esféricas ni tan siquiera valen las leyes de la geometría plana, que tan solo son aplicables localmente en pequeñas porciones, si acordamos aceptar la existencia de un error despreciable. Para representar grandes áreas de la superficie terrestre se necesitan técnicas especiales que se vienen desarrollando ya desde la Antigüedad, a partir del momento en que se sospechó que la Tierra era esférica.

La representación y el estudio de la superficie terrestre están íntimamente relacionados. A la hora de realizar estudios geográficos se consideran zonas de tierra definidas en base a la continuidad, como son los continentes, y zonas de agua líquida delimitadas por los océanos. La superficie terrestre cuenta con

desniveles que van desde los 8848 m de altura del monte Everest, en la cadena montañosa del Himalaya, hasta los 11034 m de profundidad del abismo Challenger, en la fosa de las Marianas, en pleno océano Pacífico. Para referenciar la altura y la profundidad se usa el nivel del mar, que no forma una esfera perfecta, ya que la Tierra está achatada por los polos, además de presentar otras irregularidades menores. Los radios ecuatorial y polar del esferoide terrestre miden 6378 km y 6357 km respectivamente. Tanto el desnivel máximo en la superficie terrestre como la diferencia entre los distintos radios del esferoide es de aproximadamente unos veinte kilómetros, lo que supone tan solo un 0,3% de desviación del radio medio terrestre. Es una distancia pequeña a escala planetaria, pero enorme a escala humana.

Finalmente, uno de los aspectos que nos interesan más como humanos es cómo nuestra especie está distribuida por la superficie terrestre. Desde hace unos cien mil años el ser humano empezó a establecerse por toda la Tierra, pero tan solo desde hace unos diez mil lo hace formando núcleos de población estable. La población mundial ha ido aumentando desde entonces, sufriendo una fase exponencial durante el siglo xx que se ha vuelto especialmente intensa en las últimas décadas. En la actualidad parece que esta tendencia se ha visto frenada, aunque durante las próximas décadas el crecimiento seguirá y, en algunas zonas, de forma importante. Otra tendencia que está teniendo lugar actualmente es la concentración de la población en grandes ciudades. Habrá que estar atento a la evolución de estas preferencias en el futuro para intentar corregir aquellos hábitos que sean insostenibles.

OBJETIVO: PLASMAR LA TIERRA EN UN PLANO

La representación de la superficie terrestre en un plano no es una cuestión sencilla ni inmediata, ya que implica la transformación de una superficie esférica de tres dimensiones sobre una superficie plana de dos dimensiones. Para comprender me-

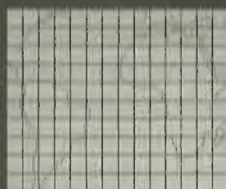
jor la dificultad de este proceso, cabe señalar que las distancias y los ángulos sobre la superficie terrestre ni siquiera responden a las leyes de la geometría plana, por lo que necesitan de una geometría esférica. Las únicas representaciones terrestres que pueden reproducir fielmente la proporción de distancias y de los ángulos son las representaciones sobre esferas, es decir, globos terráqueos o modelos tridimensionales por ordenador. En todo caso, aunque los planos sean incapaces de reproducir con total fidelidad la superficie terrestre, son un instrumento de gran utilidad y de uso frecuente. Para su elaboración se usan varios tipos de proyecciones, cada uno de los cuales tiene características que lo hacen más adecuado para la representación de ciertos aspectos. Los tres tipos básicos de proyecciones que se usan son: las proyecciones cilíndricas, las proyecciones cónicas y las proyecciones planas. Estos tipos básicos pueden ser convenientemente modificados con fines diversos. La idea principal es que, al final, a cada punto de la esfera le corresponde un punto del plano, pudiéndose describir las transformaciones también con fórmulas algebraicas.

Tanto las proyecciones cilíndricas como las cónicas se valen de una superficie tridimensional auxiliar fácilmente desplegable en un plano. En las cilíndricas se toma normalmente el eje de rotación de la Tierra como referencia, proyectando los meridianos en líneas rectas sobre el cilindro. El principal inconveniente que tienen es que los polos son representados como una línea, cuando en realidad son un punto. Todas aquellas superficies cercanas a los polos presentan, pues, una gran deformación. Entre las proyecciones más utilizadas históricamente para representar la totalidad de la superficie terrestre, como muestra la ilustración de las págs. 64-65, encontramos varias de tipo cilíndrico. Algunas de las más conocidas son la equidistante, la de Mercator y la de Peters, cada una de las cuales establece una escala distinta en la dirección de los meridianos. La proyección equidistante mantiene la proporcionalidad de las distancias medidas a lo largo de los meridianos. En cambio, la de Mercator aumenta la escala a medida que se acerca a los polos, intentando mantener la forma pero perdiendo la superficie. Y la

CÓMO REPRESENTAR UNA TIERRA ESFÉRICA EN EL PLANO: LAS PROYECCIONES CARTOGRAFICAS MÁS USADAS



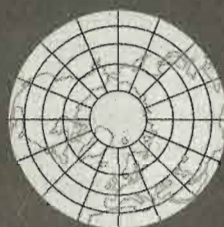
PROYECCIÓN CILÍNDRICA



PROYECCIÓN CÓNICA



PROYECCIÓN PLANA



Cilíndrica de Mercator

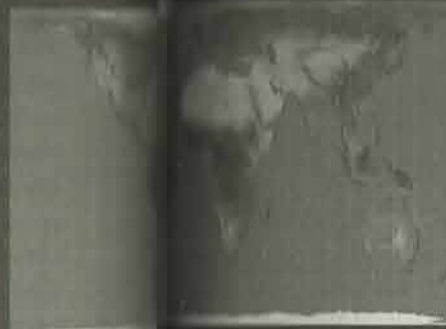


Cónica equidistante



Plana polar ortográfica

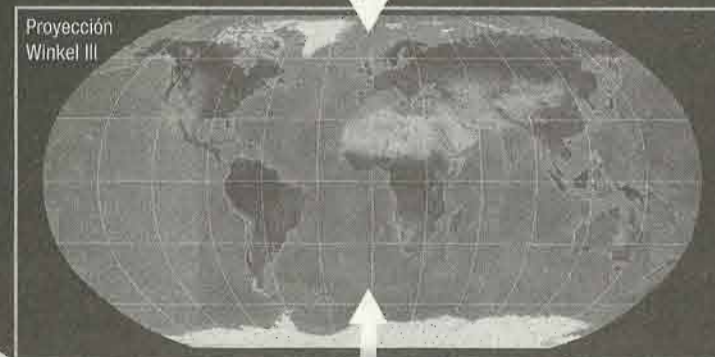
Las tres proyecciones cartográficas básicas son la *cilíndrica*, que proyecta la superficie terrestre en un cilindro, la *cónica*, que hace lo propio en una superficie cónica tangente, y la *plana*, también llamada azimutal o polar, que representa la geografía de nuestro planeta sobre un plano tangente al globo en un determinado punto.



Cilíndrica de Peters



Cilíndrica equidistante



Proyección Winkel III



Plana polar equidistante



Plana ecuatorial modificada de Aitoff

El objetivo es lograr una representación lo más fidedigna posible. Hoy una de las proyecciones más usadas para representar el mapamundi es la de Winkel-Tripel, también llamada Winkel III, que es una media aritmética entre otras dos proyecciones, la cilíndrica equidistante y la de Aitoff.

de Peters disminuye la escala conforme se acerca a los polos, intentando mantener la superficie pero perdiendo la forma. Por otro lado, en las proyecciones cónicas se toma también normalmente el eje de rotación de la Tierra como referencia, aunque ocasionalmente se puede tomar otro.

La virtud de los mapas es esa, exhiben la reductible disponibilidad del espacio, previenen que todo puede acontecer en él. Y acontece.

JOSÉ SARAMAGO EN *LA BALSA DE PIEDRA*

Las proyecciones planas no se valen de ninguna superficie auxiliar, sino que, como indica su nombre, proyectan directamente sobre un plano. Son especialmente adecuadas para representar partes muy concretas de la superficie terrestre, aunque si se modifican adecuadamente, también sirven para su totali-

dad. Una de las más características es la que usa un plano perpendicular al eje de rotación de la Tierra, conocida como proyección polar. En ella los meridianos aparecen como líneas rectas que convergen en uno de los polos. Para proyectar la totalidad de la superficie terrestre se pueden utilizar varios puntos focales o también adaptar la escala sobre los meridianos. En la proyección polar equidistante se establece una escala sobre los meridianos, de tal forma que las distancias medidas en ellos mantienen la proporcionalidad. En el caso de usar puntos focales, si estos están situados en el exterior de la Tierra se obtiene un plano similar a lo que sería una vista desde un satélite (véase la imagen de la página contigua). Es decir, solamente se visualiza la parte delimitada por el círculo tangente al punto focal, cuyas dimensiones relativas dependen de la altitud. La superficie visualizada es, pues, siempre menor a un hemisferio, el cual se ve entero solamente en el caso extremo en que el foco se sitúa en el infinito, en lo que sería una proyección ortográfica.

Finalmente, hemos visto que las proyecciones polares usan planos perpendiculares al eje de rotación, pero se pueden usar otros. Las proyecciones ecuatoriales, por ejemplo, usan planos perpendiculares al plano ecuatorial. Sea cual sea el plano, podemos definir al menos un punto de la superficie que se proyecte

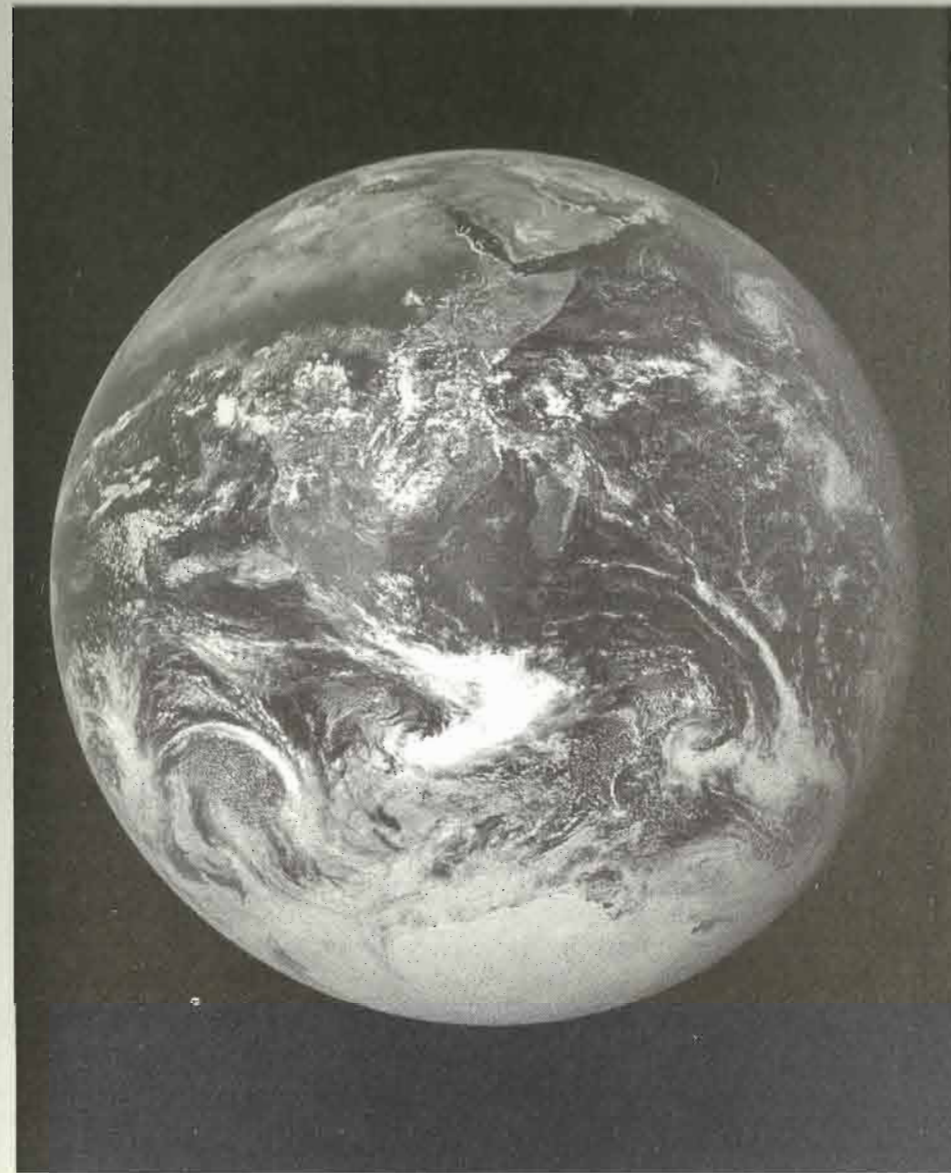


Imagen de la Tierra tomada desde un satélite que equivaldría a una proyección plana con el foco en el satélite. Nótese que no se llega a ver la mitad de la superficie terrestre, sino solamente la superficie comprendida dentro del círculo que definen las líneas tangentes a la Tierra desde el satélite.

GEOMETRÍA ESFÉRICA

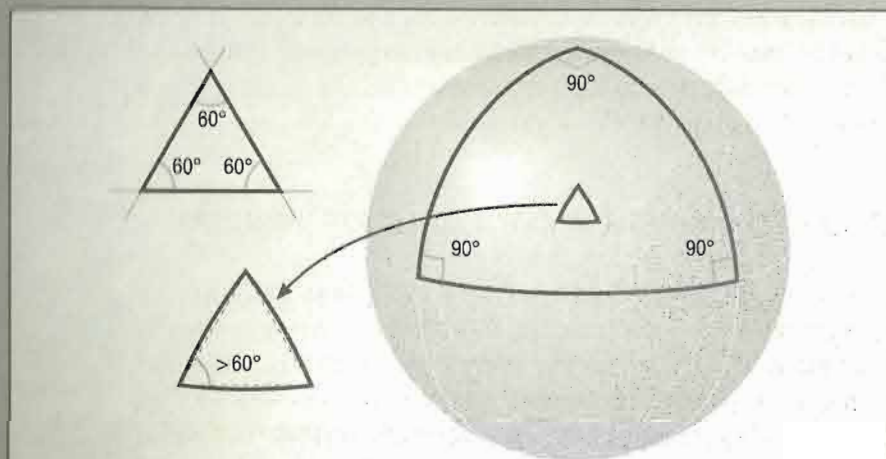
La Tierra es una esfera y, por ello, para medir distancias y ángulos en su superficie se requiere de una geometría esférica con unas leyes distintas a la geometría plana.

Las líneas geodésicas

Como sobre una superficie esférica no se pueden dibujar líneas rectas, la distancia mínima entre dos puntos es un arco de circunferencia máxima, que se conoce como *línea geodésica*. Las circunferencias máximas son aquellas cuyo centro coincide con el de la esfera y dividen su superficie en dos mitades iguales. Por ese motivo, al prolongar las líneas geodésicas, siempre se cortan en dos puntos y nunca pueden ser paralelas.

Los ángulos: la amplitud entre dos líneas que se cruzan en un vértice

El hecho de que dos líneas geodésicas no puedan ser paralelas ya deja entrever que las leyes que rigen los ángulos en la geometría esférica también tienen sus peculiaridades. Por ejemplo, si unimos tres puntos con líneas geodésicas para formar un triángulo curvo, veremos que sus ángulos no tienen por qué sumar 180° , como lo harían en el marco de la geometría plana. Cuanto mayor sea la superficie relativa del triángulo con respecto a la esfera, más distará su geometría de la plana.



El esquema muestra cómo la suma de los ángulos de un triángulo curvo sobre una esfera excede los 180° , a diferencia de los triángulos planos cuyos ángulos siempre suman esa cifra. En concreto, se representan dos triángulos formados por tres puntos equidistantes. Para el triángulo curvo se ha escogido el caso particular de los tres ángulos de 90° , los cuales suman 270° . Cuanto menor sea la superficie relativa del triángulo respecto a la esfera, más se aproximará su forma a la de un triángulo plano, y la suma de sus ángulos, a 180° .

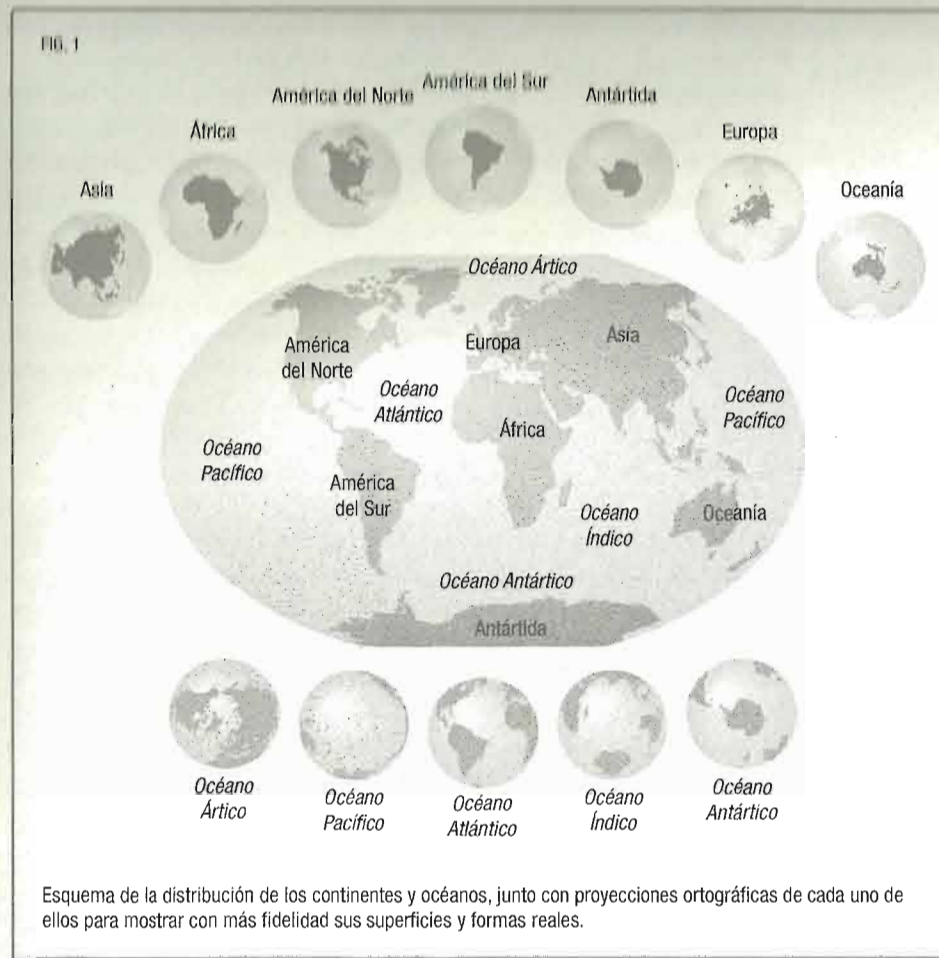
en perpendicular. Ese punto será el centro de la proyección y en superficies suficientemente pequeñas a su alrededor se podrán aplicar las leyes de la geometría plana sin cometer errores significativos, consiguiendo una de las representaciones más fieles posibles. Esta fidelidad se pierde conforme aumenta el tamaño relativo de la superficie representada respecto al total de la terrestre. Para grandes superficies, es preciso aplicar técnicas que permitan concentrar las deformaciones en zonas no críticas para la representación. Por ejemplo, la proyección Aitoff es una proyección plana ecuatorial modificada para representar en su totalidad la superficie terrestre. Para hacerla, hay que dividir previamente las longitudes por la mitad, como si tuviéramos toda la superficie terrestre concentrada en un hemisferio. Luego, se hace una proyección equidistante ecuatorial y se alarga en la dirección del ecuador para volver a compensar las longitudes. Finalmente, también existen proyecciones híbridas que intentan buscar un compromiso entre las ventajas e inconvenientes de las distintas proyecciones. Este es el caso de la proyección Winkel III, usada por la revista *National Geographic*, que es una media ponderada para ambos ejes entre la proyección cilíndrica equidistante y la de Aitoff.

GEOGRAFÍA FÍSICA: DESVELANDO LA SUPERFICIE TERRESTRE

La palabra «geografía», que proviene del griego antiguo, significa literalmente «descripción de la Tierra» y originalmente se refería a la representación gráfica de nuestro planeta. Actualmente, la palabra ha tomado un sentido más amplio y se refiere a la ciencia que estudia la superficie terrestre en todos sus aspectos. La geografía física es la rama que se centra en el estudio de las características físicas, como son el relieve, la distribución del agua y muchos otros aspectos. La primera consideración que podemos hacer sobre la superficie terrestre es que mide unos 510 millones de kilómetros cuadrados, de los cuales un 29% corresponde a tierra y un 71% corresponde a agua líquida. Así pues, la mayor parte de la superficie sólida de nuestro

planeta está cubierta por una gran masa de agua líquida. En cuanto a la superficie emergida, se reparte en grandes extensiones más o menos continuas, a partir de las cuales se definen los continentes. Estos últimos incluyen también las islas situadas cerca de la costa, vinculadas a los continentes a través de extensiones sumergidas de poca profundidad relativa, conocidas como *plataformas continentales*. Aunque casi el total de la masa de agua líquida que cubre la Tierra es continua, se puede establecer también una división en grandes zonas más o menos confinadas por tierra, que conocemos como océanos. Existen varios modelos para clasificar continentes y océanos, siendo uno de las más usuales el de los siete continentes mostrado en la figura 1.

La definición de los continentes no es estrictamente geográfica, pues obedece también a criterios históricos o culturales. Así pues, Europa y Asia se consideran muchas veces como dos continentes, aunque forman claramente una única extensión de tierra. En cuanto a América del Norte y América del Sur, tan solo unidas por el istmo de Panamá, a veces se consideran como un único continente. Es el mismo caso que el de Asia y África, tan solo unidas por el istmo de Suez, aunque rara vez se consideran conjuntamente. Según qué criterio utilicemos para definir los continentes, tanto su número como sus límites pueden variar. Por ejemplo, los cinco continentes a los que hacen referencia los cinco anillos olímpicos son: Europa, Asia, África, Oceanía y América (considerada un solo continente). Según este modelo el número de continentes sería seis, completado por la Antártida. En el caso de considerar Europa, Asia y África conjuntamente, el número de continentes se vería reducido a cuatro. Para el modelo de los siete continentes, es preciso definir los límites entre los continentes que están unidos. Los límites geográficos entre América del Norte y América del Sur o entre Asia y África están bastante claros al tratarse de istmos. Pero en el caso de Asia y Europa, la definición del límite presenta algo más de dificultad, así que tradicionalmente se ha considerado que la frontera entre ambos es la separación física que constituyen los montes Urales. Por otro lado, Oceanía es un continente formado por la plata-



forma continental australiana, a la cual pertenecen multitud de grandes islas y archipiélagos.

La deformación de distancias y ángulos propia de la proyección de la superficie terrestre en un plano provoca que las superficies y formas reales de los continentes no aparezcan representadas con total fidelidad. En muchas de las proyecciones más utilizadas, las zonas cercanas al ecuador son percibidas como más pequeñas y las cercanas a los polos como más gran-

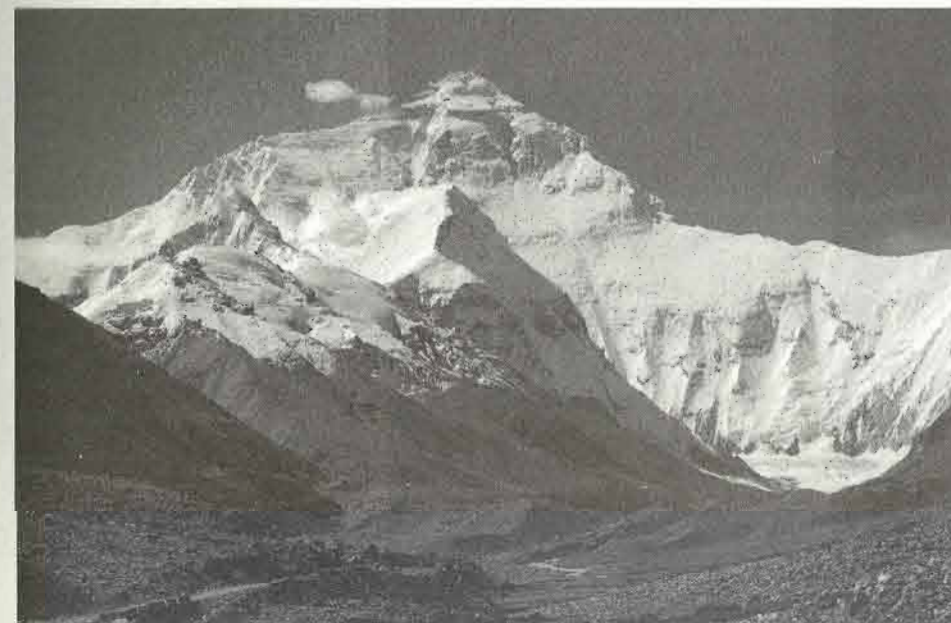
des de lo que son en realidad. Por ejemplo, podemos tener la sensación de que el continente africano es más pequeño de lo que verdaderamente es. De hecho, África abarca el 20,4% de las

tierras emergidas y ocupa el segundo lugar en extensión en el modelo de los siete continentes, solamente superada por Asia con el 29,7%. Aunque en muchos mapas no lo parezca, África es casi una cuarta parte mayor que América del Norte que, con el 16,4%, ocupa la tercera posición.

Le siguen América del Sur con el

11,9%, la Antártida con el 9,2%, Europa con el 6,8% y Oceanía con el 5,7%.

En cuanto a los océanos, se considera que el Atlántico, Índico y Pacífico son los tres principales. Adicionalmente, se pueden considerar también océanos los ubicados alrededor de los dos polos: el océano Ártico, en el polo norte, y el océano Antártico en el polo sur. El océano Ártico tiene una superficie de tan solo 14 millones de kilómetros cuadrados, menos de un 4% de la superficie oceánica total, por lo que hay quien considera que es un mar. El océano Antártico no es mucho mayor, unos 20 millones de kilómetros cuadrados, y su definición es motivo de controversia pues no tiene una delimitación clara. Actualmente se define como la masa de agua líquida que rodea la Antártida, al sur del paralelo situado a 60° S de latitud. Dos hechos son los que le dan entidad propia: las corrientes oceánicas que se generan alrededor de la Antártida y la fina capa de hielo estacional que lo cubre en invierno. Volviendo a los océanos principales, el mayor con diferencia es el océano Pacífico, que cubre una superficie de unos 165 millones de kilómetros cuadrados, casi la mitad de la superficie oceánica y un tercio de la superficie total de la Tierra. El resto de la superficie oceánica se reparte básicamente entre los otros dos océanos principales, siendo la superficie del Índico casi tres cuartas partes de la del Atlántico. Todos los océanos están comunicados, lo que hace que sus masas de agua se asienten por el efecto de la gravedad terrestre,



Arriba, representación del relieve global de la Tierra. En cuanto a las partes emergidas, destacan las cadenas montañosas del Himalaya y Karakórum limitando por el suroeste el altiplano del Tíbet, en Asia, así como la de los Andes recorriendo el oeste de América del Sur. En cuanto a las partes sumergidas, destacan las plataformas continentales, especialmente extensas en las cercanías del polo norte y en la costa este de Asia y Oceanía. En la fotografía inferior se alza majestuoso el Everest, el pico más alto del planeta.

LA EXPLORACIÓN DE LOS FONDOS OCEÁNICOS

Lo que ocurre en el interior de los océanos es mucho menos conocido que lo que sucede en los continentes, que son el dominio natural donde el ser humano se ha movido siempre. A la imposibilidad evidente de moverse bajo el agua sin un equipo adecuado se añade la dificultad que supone la opacidad de las grandes masas de agua. En las mejores circunstancias, con aguas transparentes en la zona tropical, la luz tan solo puede penetrar hasta un par de cientos de metros.

Siglo XIX: métodos de exploración marina a la antigua usanza

La primera exploración del fondo oceánico como tal fue la emprendida por la expedición científica británica Challenger, que se desarrolló a bordo de la corbeta bautizada con el mismo nombre. Se considera que esta expedición, que tuvo lugar entre 1872 y 1876, fue el primer gran esfuerzo acometido para conocer los fondos oceánicos a escala global. Durante su transcurso se detectó la dorsal Atlántica y el punto oceánico más profundo, en la fosa de las Marianas, llamado abismo Challenger en su honor. Y eso que sus métodos eran, vistos desde hoy, de lo más rudimentario: se basaban en el sondeo realizado simplemente con un lastre atado a una cuerda.

Un gran invento: el sonar

Actualmente, la técnica más precisa para el mapeo de los fondos oceánicos es el sonar (acrónimo del inglés *Sound Navigation and Ranging* o «navegación y localización por sonido»), que emplea la propagación del sonido. Se basa en el envío de sonidos bajo el agua y el posterior análisis de su eco, al igual que hacen los murciélagos en el aire. El sonar se extendió a principios del siglo XX, tras el hundimiento del célebre transatlántico RMS Titanic, provocado por el choque contra un iceberg que no había sido detectado. Desde entonces, se ha usado ampliamente en navegación tanto para la detección del relieve sumergido como para las comunicaciones.

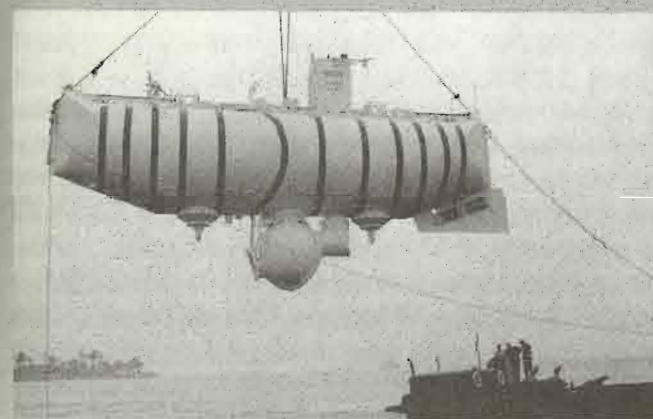
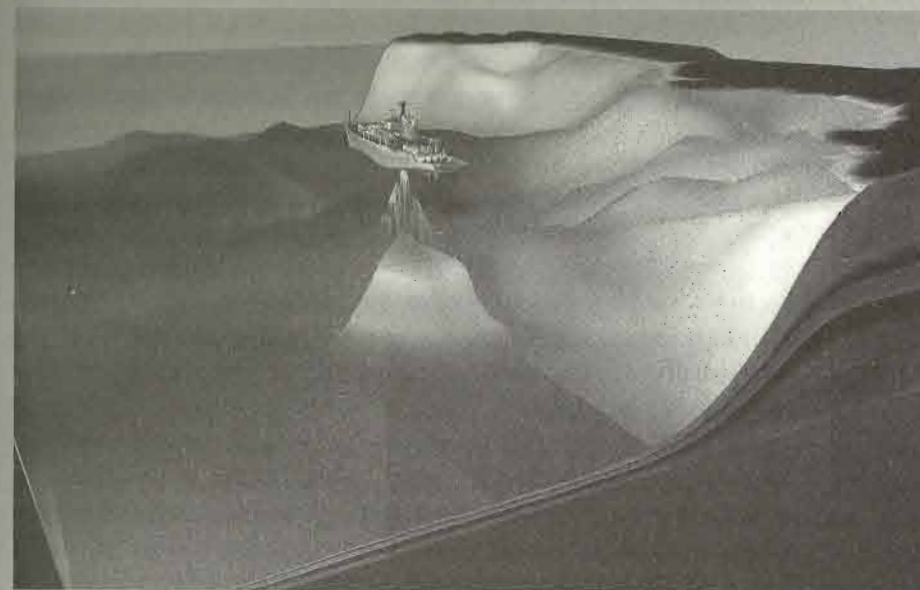
Un paso más: los vehículos de inmersión profunda

Los primeros intentos de submarinos motorizados se produjeron durante el siglo XIX y recibieron un impulso definitivo durante las dos guerras mundiales del siglo XX. Tras la Segunda Guerra Mundial, el inventor y explorador suizo Auguste Piccard (1884-1962) desarrolló un nuevo artículo para el uso científico, el batiscafo. Se trataba de una nave con movilidad reducida, pero que podía llegar a grandes profundidades. Los primeros hombres en descender al abismo Challenger, Jacques Piccard —hijo de Auguste— y Don Walsh, lo hicieron a bordo del batiscafo Trieste en el año 1960. A día de hoy, tan solo otra persona, el célebre director de la película Titanic y explorador de National Geographic James Cameron, ha logrado repetir la proeza, a bordo del batiscafo Deepsea Challenge.

Explorando el fondo: estudios gravimétricos

El conocimiento básico del relieve de los fondos oceánicos ha mejorado recientemente gracias a los estudios de las anomalías gravitatorias (que hacen referencia a la diferencia entre el valor de la gravedad observado en un determinado lugar y el teórico) y altimétricas del nivel del mar

obtenidas por satélite. Estos estudios han servido para completar los precisos mapas locales de los que ya se disponía gracias a los sonares de los barcos. Actualmente, nuestra visión global de los fondos oceánicos cuenta con una precisión aceptable, y completa así la visión total de la superficie sólida de nuestro planeta.



Arriba, representación del mapeo de los fondos oceánicos con sonar desde un barco. A la izquierda, imagen del batiscafo Trieste, primera nave tripulada en llegar al abismo Challenger en la fosa de las Marianas.

formando un esferoide cuya superficie exterior recibe el nombre de «nivel del mar».

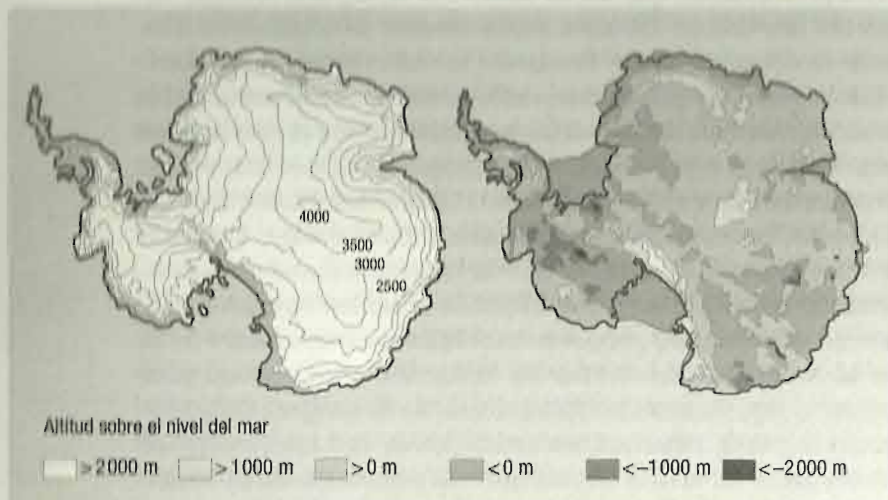
El nivel del mar es usado como referencia para describir todo el relieve de la superficie terrestre, tanto el de las zonas emergidas como el de las sumergidas. La superficie del nivel del mar se mantiene perpendicular al campo gravitatorio terrestre, con sus pequeñas irregularidades que responden a la distribución heterogénea de la masa terrestre. También presenta ligeras variaciones temporales por efecto de las fuerzas de marea de la Luna y el Sol. Estas variaciones temporales hacen necesario calcular el promedio de su posición para referenciar el relieve, que para las zonas emergidas tiene una altura media de unos 850 m. Los únicos continentes que superan esa altura media son la Antártida, con más de 2000 m debidos a su gruesa cobertura de hielo, y Asia con unos 950 m, en cuya parte central podemos encontrar un gran número de extensos altiplanos entre los que destaca el del Tíbet. Este último está delimitado al sur por las cadenas montañosas del Himalaya y del Karakórum, donde se encuentran las cimas más altas del planeta, entre las que destaca el monte Everest, que es el punto más alto de la superficie con 8848 m. Ligeramente por debajo de la altura media total encontramos África, América del Norte y América del Sur. En este último continente destaca la cadena montañosa de los Andes, que recorre su costa oeste e incluye las montañas más altas fuera de Asia. Finalmente, Oceanía y Europa están bastante por debajo de la media total.

El relieve de las zonas sumergidas se conoce muchísimo menos que el de las emergidas, mapeadas directamente por satélite. De hecho, el relieve de la superficie sólida bajo los océanos se conoce con menor precisión que el de la Luna o Marte. El conocimiento de su relieve básico se ha visto mejorado recientemente gracias a los estudios realizados sobre las anomalías gravitatorias y altimétricas en el nivel del mar, ambas obtenidas también por satélite. La profundidad media del océano está en torno a los 4000 m y su relieve básico incluye plataformas continentales, dorsales y fosas, relacionadas con las fuerzas interiores de la Tierra. Las plataformas continentales forman parte de

la misma estructura que los continentes, pero están sumergidas a poca profundidad, que oscila alrededor de los 200 m. Tras extenderse por debajo del agua hasta cientos de kilómetros más allá de la costa, terminan formando taludes de mayor pendiente. Las dorsales oceánicas son cadenas montañosas sumergidas que se encuentran en las partes centrales de los océanos y las fosas oceánicas son profundas zanjas que se encuentran en los márgenes de los océanos junto a los continentes y arcos de islas volcánicas. Se encuentran mayormente en el océano Pacífico, como la fosa de las Marianas, donde ya hemos dicho que se encuentra el abismo Challenger, el punto oceánico más profundo del planeta. Atención, porque en muchas representaciones de la fosa se usan distintas escalas en horizontal y en vertical para facilitar la representación, distorsionando la imagen. Como resultado se puede tener la falsa sensación de que las pendientes a ambos lados de la fosa son mucho más pronunciadas de lo que son en realidad. No hay que olvidar que el relieve de los fondos oceánicos es susceptible de ser alterado tanto por el efecto de su constante renovación como por las corrientes. Detectar estas variaciones con un nivel de detalle suficiente solo se puede lograr en el pequeño porcentaje de los fondos oceánicos que ha sido mapeado con el sonar por los barcos, los cuales concentran su actividad en las rutas comerciales.

La Antártida constituye un caso aparte en la superficie terrestre, ya que está completamente cubierta por una capa de hielo con un grosor medio de más de 2000 m, que puede alcanzar puntualmente los casi 5000 m. Este manto de hielo supone aproximadamente el 90% del total de las reservas de hielo sobre nuestro planeta, así como el mayor acúmulo de agua dulce existente en la Tierra. La capa helada antártica sufre variaciones estacionales y, en invierno, supera ampliamente los límites del continente. En el relieve de la Antártida destacan los montes Transantárticos y la península Antártica, los cuales separan el continente en las partes oriental y occidental. En cuanto al resto de la superficie rocosa bajo el hielo, aunque no se conoce con precisión, se estima que una gran parte se encuentra bajo el nivel del mar (figura 2).

FIG. 2



Esquema del relieve sobre y bajo la capa de hielo de la Antártida.

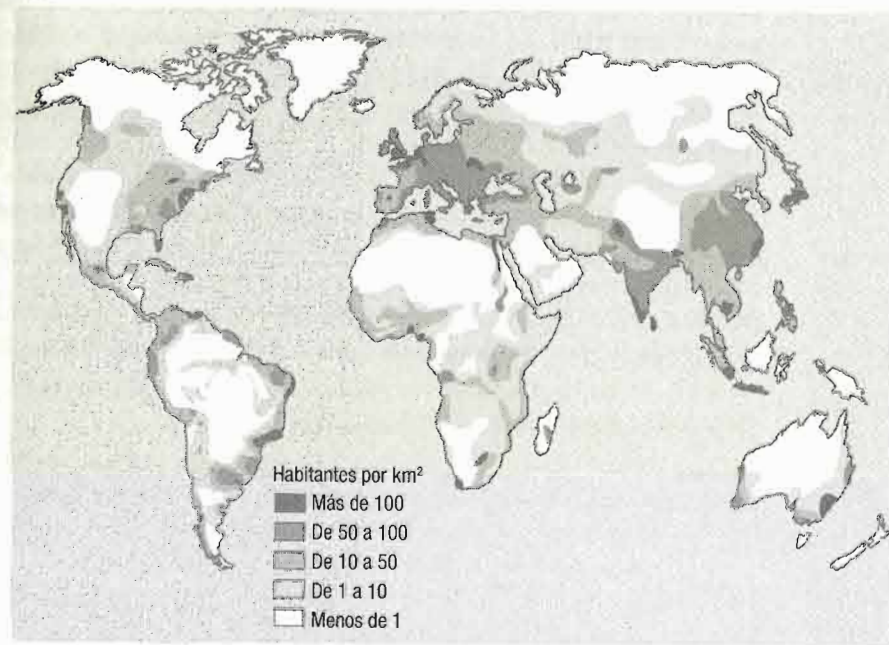
GEOGRAFÍA HUMANA: DE CÓMO LOS HUMANOS SE DISTRIBUYEN SOBRE EL PLANETA

Hemos visto el relieve y las características básicas de las tierras emergidas y sumergidas, que constituyen una parte de la geografía física. Para finalizar este capítulo, nos centraremos en los aspectos relacionados con el hombre, es decir, la geografía humana. Existen actualmente en el mundo más de siete mil millones de personas, lo que supone una densidad media de unos cincuenta habitantes por kilómetro cuadrado de tierra emergida. Globalmente, el continente con un mayor número de personas es Asia, donde se concentra alrededor del 60% de la población mundial. Y es que, además de ser el continente con mayor superficie, es también el más densamente poblado, con una media de alrededor de cien habitantes por kilómetro cuadrado. El segundo continente en número de personas es África, con algo menos de una sexta

parte de la población mundial. El siguiente es Europa que, a pesar de su tamaño moderado, presenta una alta densidad, siendo el único continente junto a Asia que supera la media mundial. América del Norte y América del Sur tienen una densidad menor que África, e incluso considerados conjuntamente, su población es menor que la del continente africano. Oceanía, el continente más pequeño, es muy poco denso y concentra menos del uno por cien de la población mundial. Finalmente, la Antártida puede ser ignorada en términos de población, ya que se encuentra únicamente de forma testimonial en las bases científicas.

En el interior de un mismo continente, la distribución de la población no es uniforme sino que se concentra en zonas muy concretas (figura 3). Por ejemplo, los dos países asiáticos más po-

FIG. 3



Esquema de la distribución de la densidad de población (habitantes por kilómetro cuadrado) en la superficie terrestre.

blados son India y China, que suman más de un tercio de la población mundial, superando ampliamente los mil millones de personas cada uno. Históricamente, el hombre ha tendido a poblar los cursos de los grandes ríos y las zonas cercanas a la costa, donde las condiciones para la agricultura eran más favorables. Esta propensión se ha mantenido en la actualidad, añadiéndose, además, la tendencia a concentrarse en grandes ciudades que empezó en la Europa del siglo xix con la revolución industrial, y que se ha globalizado en la actualidad. La población mundial ha aumentado de forma espectacular durante el siglo xx, especialmente durante las últimas décadas, en las que se duplicó, y más de la mitad vive actualmente en urbes, previéndose que llegue a las tres cuartas partes en un futuro no muy lejano.

Concretamente, en las próximas décadas se estima que tendrá lugar un aumento de la población mundial que nos situará en el umbral de los diez mil millones de habitantes a finales de este siglo. Gran parte de este crecimiento corresponderá a África, que puede multiplicar su población varias veces. Sin duda uno de los mayores retos que tendrá la humanidad será cubrir las necesidades básicas de toda esta población. Esto puede suponer afrontar problemas como la escasez de ciertos minerales o de los combustibles fósiles, como el gas y el petróleo, que usamos en grandes cantidades en el desarrollo de nuestra actividad. Afortunadamente, hoy contamos con un alto nivel de conciencia que llega fácilmente a todos los rincones del mundo gracias a la desarrollada red de telecomunicaciones de que disponemos. De todas formas, es importante seguir mejorando el conocimiento de nuestro planeta para afrontar mejor el futuro.

Bajo la superficie: las fuerzas internas

El 26 de diciembre de 2004 un gran terremoto sacudió el océano Índico, desencadenando un tsunami que provocó cientos de miles de muertos. Aunque aún somos incapaces de predecir este tipo de tragedias, es mucho lo que hemos avanzado en el conocimiento de las fuerzas que actúan en el interior de nuestro planeta.

Sismicidad y vulcanismo son dos fenómenos que, aunque se manifiestan con poca frecuencia, destacan por su violencia. Sin duda han llamado siempre la atención de los seres humanos, que desde sus inicios se han preguntado cómo se originaban. Actualmente sabemos que están relacionados con las mismas fuerzas internas que a largo plazo generan los desniveles sobre la superficie, proceso conocido como *orogénesis*. Para comprender cómo funcionan todos estos fenómenos es preciso que entendamos la estructura interna de nuestro planeta. Gracias a décadas de observación y estudio de los fenómenos que ocurren en la superficie, hemos podido deducir algunas de las características de los materiales subyacentes. Por ejemplo, sabemos que varían sus características con la profundidad. Esta variación es ocasionalmente brusca y forma discontinuidades, lo que nos lleva a considerar que estos materiales están divididos en capas. El modelo estratigráfico más básico del que disponemos divide el interior de nuestro planeta en núcleo, manto y corteza, que a su vez pueden dividirse en varias subcapas. Es una forma de ordenarlo, porque la realidad es mucho más compleja, ya que entre las capas existen numerosas transiciones irregulares.

A mayor profundidad, aumentan la presión, la temperatura y la densidad de los materiales que conforman cada una de las subcapas en que se divide el interior de la Tierra. En la parte central, la densidad puede llegar a multiplicarse por cuatro, y la temperatura, aumentar un orden de magnitud (multiplicada por más de diez), pudiendo llegar a alcanzar valores próximos a los de la superficie solar. Una pequeña parte de ese calor se acumuló durante la formación del planeta; el resto es el resultado de procesos de fisión atómica, básicamente de isótopos de uranio, torio y potasio. Este calor se va perdiendo a través de las capas superiores, generando circulaciones de materiales, que en última instancia son los causantes de los fenómenos sísmicos, volcánicos y orogénicos. Estos fenómenos tienden a concentrarse en zonas muy particulares de la superficie, identificadas como los márgenes de las placas tectónicas en que se divide la capa que comprende la corteza y la parte más superior del manto, llamada *litosfera*.

La litosfera es la capa mejor conocida, en la que el ser humano desarrolla toda su actividad. Es una capa rígida formada por estructuras de rocas de orígenes y propiedades distintas. Su estudio recibe el nombre de geología y es de gran interés para el ser humano. La mayor parte de la litosfera está formada por material procedente del manto, pero la más superficial responde a otra lógica: es el resultado del proceso de erosión y sedimentación. Los relieves levantados por las fuerzas internas son erosionados por las capas que fluyen sobre la superficie, disgregándose en pequeños fragmentos que son transportados a cuencas sedimentarias, donde se depositan en capas horizontales. El acúmulo de estas capas acaba formando rocas que, al cabo del tiempo, quizá vuelvan a ser levantadas y deformadas de nuevo por las fuerzas del interior.

UNA OJEADA A LAS ENTRAÑAS TERRESTRES: LA ESTRUCTURA INTERNA

La densidad de la Tierra se conoce con una aproximación aceptable desde finales de siglo XVIII, y su valor actual se estima en torno a los 5500 kg/m³. Este valor es mucho mayor que el de la densidad

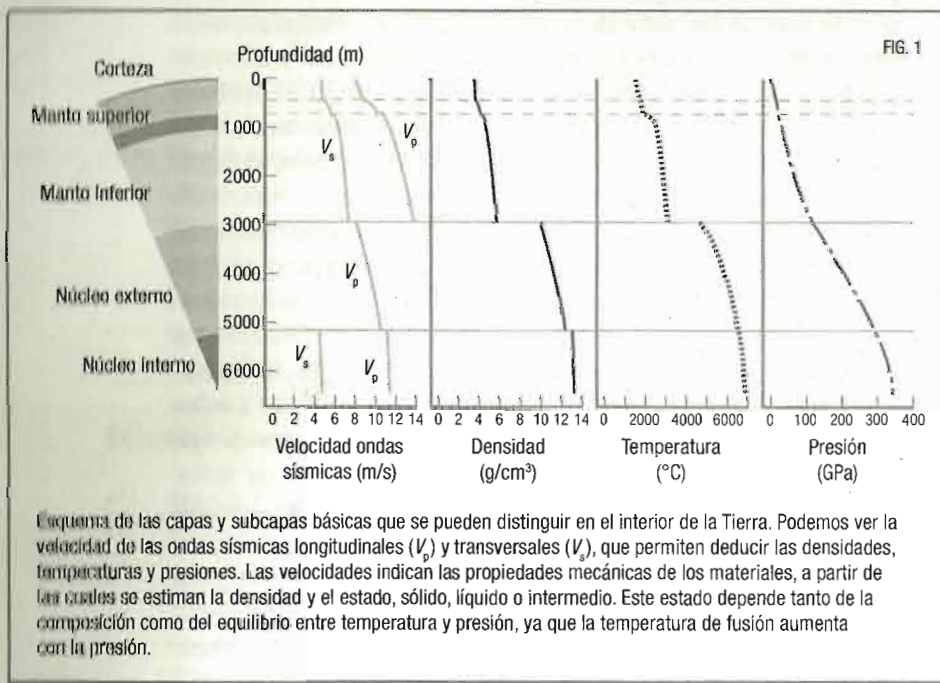
media de las rocas de la superficie, formadas principalmente por compuestos de oxígeno y silicio. El granito y el basalto, los dos tipos de roca más representativos de los continentes y del fondo oceánico respectivamente, tienen densidades que oscilan entre 2700 kg/m³ y 3000 kg/m³. Esto nos indica que los materiales del interior del planeta deben ser mucho más densos, aunque su composición no se conoce directamente. De hecho, tan solo se ha podido realizar el análisis químico de materiales situados a profundidades de unos 10 km bajo la superficie. Así que la composición de los materiales más profundos (el punto central de la Tierra se halla a más de 6000 km de profundidad) tiene que ser deducida indirectamente. Una fuente de información muy valiosa para realizar esta deducción son los meteoritos encontrados sobre la superficie terrestre: muchos de ellos se formaron durante los estadios iniciales del sistema solar, al igual que nuestro planeta, y algunos presentan altísimas concentraciones de hierro. Se estima que la Tierra está formada por un 32,1% de hierro, un 30,1% de oxígeno, un 15,1% de silicio y un 13,9% de magnesio, además de cantidades menores de azufre, calcio, aluminio y muchos otros elementos. Estos elementos y los compuestos que forman han tendido a ordenarse por densidad, siendo la concentración de hierro en la parte central mucho mayor que en la parte superficial.

Por otro lado, como hemos dicho, también la temperatura de la Tierra aumenta con la profundidad. En las zonas cercanas a la superficie este aumento es de 33 °C por kilómetro, pero el ratio disminuye en las capas internas. Si se mantuviese constante, a 1000 km de profundidad se alcanzaría una temperatura de 30000 °C, lo que implicaría la fusión de las rocas. Sabemos que esto no es así por los estudios de la propagación de ondas sísmicas tras un terremoto, por lo que se considera que a esa profundidad el incremento de temperatura pasa a ser de unos 0,5 °C por kilómetro, y que en el centro de la Tierra la temperatura no supera los 7000 °C. De hecho, todas las estimaciones sobre las variaciones de la densidad, la temperatura y la presión del interior de la Tierra se basan en el estudio de las ondas sísmicas y sus velocidades de propagación. De estos estudios se desprende que las variaciones no son siempre continuas, sino que existe

una estructura de capas básica que, como ya hemos dicho, son el núcleo, el manto y la corteza (figura 1), establecida en base a la composición química estimada. El núcleo es una esfera central de unos 3500 km de radio, formada básicamente por hierro. Por encima se encuentra el manto, que se extiende hasta pocos kilómetros de la superficie y estaría formado básicamente por óxidos de silicio y magnesio. La capa más externa de la Tierra es la corteza, cuyo grosor puede variar desde 5 km en los océanos hasta 70 km en las partes más gruesas de los continentes; está formada básicamente por compuestos de silicio y oxígeno.

El núcleo: el interior más profundo

El núcleo terrestre tiene unos 3500 km de radio, lo que supone algo más de la mitad del radio total. Esto significa que su volu-

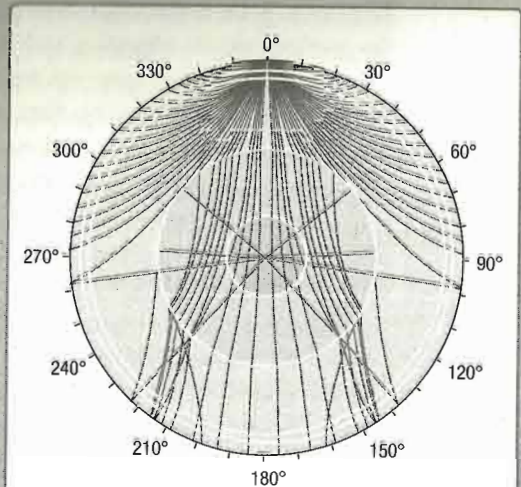


SISMOLOGÍA: OBSERVANDO LOS TEMBLORES DE LA TIERRA

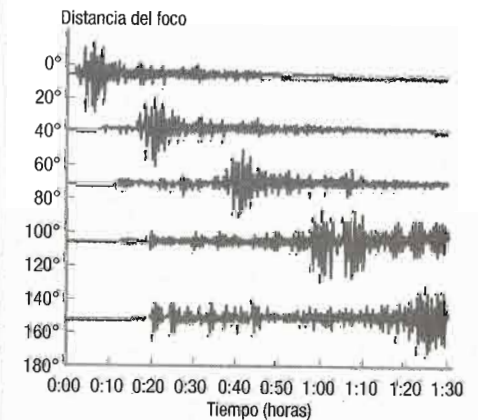
La sismología es el estudio de los seísmos o temblores. Estos fenómenos consisten en movimientos bruscos de tierra que provocan ondas que se transmiten por la superficie y el interior de la Tierra. Comparando el tiempo que tardan en llegar a los distintos sismómetros de todo el planeta se puede hacer una estimación de la estructura de capas del interior de la Tierra y de sus propiedades.

Las ondas longitudinales y transversales

Existen dos tipos básicos de ondas sísmicas: las longitudinales y las transversales. Su velocidad de propagación depende de las propiedades elásticas del medio. Las observaciones indican que en el interior de la Tierra estas propiedades varían, tanto de forma continua como discontinua, con la profundidad. Cuando lo hacen de forma continua, las ondas describen trayectorias curvas. Cuando hay cambios bruscos, por ejemplo en la frontera entre dos materiales distintos, la onda puede ser total o parcialmente reflejada por la discontinuidad. Gracias a los tiempos de llegada de las ondas y sus reflexiones, registradas por los distintos sismómetros del planeta, se pueden estimar las velocidades de propagación en las distintas capas y, a partir de ahí, sus propiedades. Por ejemplo, las ondas transversales solo se transmiten a través de medios con elasticidad transversal, y el hecho de que no puedan atravesar el núcleo externo es un indicador de que tiene naturaleza líquida.



Arriba, esquema de las trayectorias estimadas a través del interior de la Tierra que siguen las ondas longitudinales desde el foco de un seísmo. Abajo, registros de las ondas en sismómetros situados a distintas distancias del foco del seísmo.



men representa tan solo una sexta parte del volumen terrestre. En cuanto a su masa, se estima que es aproximadamente un tercio de la masa terrestre debido a su alta densidad, cuyo valor superaría los 10000 kg/m³, casi el doble de la media del planeta. El núcleo estaría formado básicamente por hierro, con un pequeño porcentaje de níquel y, quizá, cantidades menores de azufre

La geología nos dio la medida de la inmensidad del tiempo y nos mostró lo poco que nuestra especie ocupa en él.

STEPHEN JAY GOULD, PALEONTÓLOGO

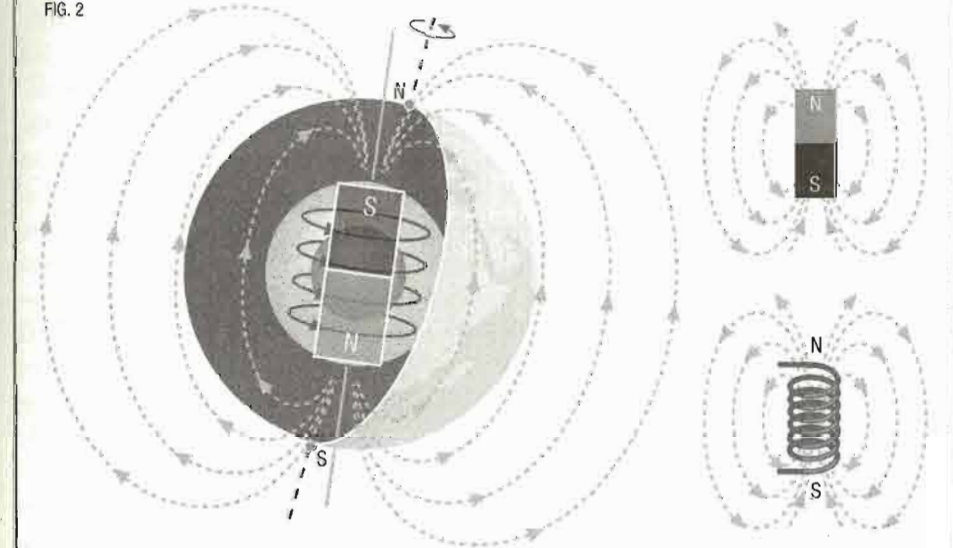
y oxígeno. La densidad y la temperatura son mayores en el centro y van disminuyendo ligeramente hasta el manto, donde se estima que se produce una disminución brusca de ambas, llamada *discontinuidad de Gutenberg*. Dentro del propio núcleo existe también una discontinuidad menor,

conocida como *discontinuidad de Lehmann*, que lo divide en dos subcapas: el núcleo interno y el núcleo externo. Se cree que ambas tienen una composición muy parecida y que su principal diferencia es que el núcleo interno sería sólido, mientras que el externo estaría fundido. La naturaleza líquida del núcleo externo se deduce del hecho de que no propaga las ondas sísmicas transversales. Los estudios de las ondas sísmicas indican también que el núcleo interno tiene unos 1250 km de radio y su velocidad de rotación es ligeramente superior a la del resto del planeta. Es decir, tiene una rotación relativa hacia el este respecto a la superficie. Por otro lado, el núcleo externo va desde los 1250 hasta los 3500 km y parece que tiene una rotación relativa que va en dirección contraria a la del núcleo interno.

La hipótesis de que el núcleo está formado de hierro concuerda con la existencia del campo magnético terrestre. Concretamente, se cree que este campo se origina a causa de corrientes de convección en el núcleo externo, aunque no está claro el mecanismo por el cual esto sucede y se han propuesto varios modelos para explicar el fenómeno. En todo caso, existen corrientes eléctricas que tienen un sentido de giro predominante hacia el oeste (figura 2), convirtiendo a la Tierra en un gran imán. Es preciso aclarar que los polos norte y sur de la Tierra están invertidos respecto a cómo están definidos los mismos para el resto de los imanes.

Esto es debido a que, inicialmente, debido al hábito adquirido con las brújulas, se definió el polo norte de un imán como el polo que tiende a orientarse hacia el polo norte terrestre. Según esta definición, y considerando que los polos opuestos se atraen, el polo magnético terrestre situado cerca del polo norte es en realidad el polo sur magnético. Sin embargo, por motivos culturales sigue llamándose «polo geomagnético norte». Por otro lado, para describir el campo magnético se usan líneas cerradas que, en el caso de los imanes, unen los dos polos por el exterior y se cierran por el interior. Se ha convenido definir el campo magnético tomando la dirección que va desde el polo norte al polo sur por el exterior del imán. En el caso de la Tierra, al tener los nombres de los polos cambiados, estas líneas van desde el polo sur al polo norte. Hay que decir que el campo magnético terrestre no ha tenido siem-

FIG. 2



A la izquierda, esquema del funcionamiento de la Tierra como un gran imán por el efecto de corrientes eléctricas que estarían situadas en el núcleo externo. Los polos norte y sur terrestres están invertidos respecto a los polos norte y sur definidos según la teoría electromagnética para describir los campos magnéticos de imanes y bobinas. Por eso las líneas que marcan el flujo magnético de la Tierra están invertidas respecto a las del imán y la bobina.

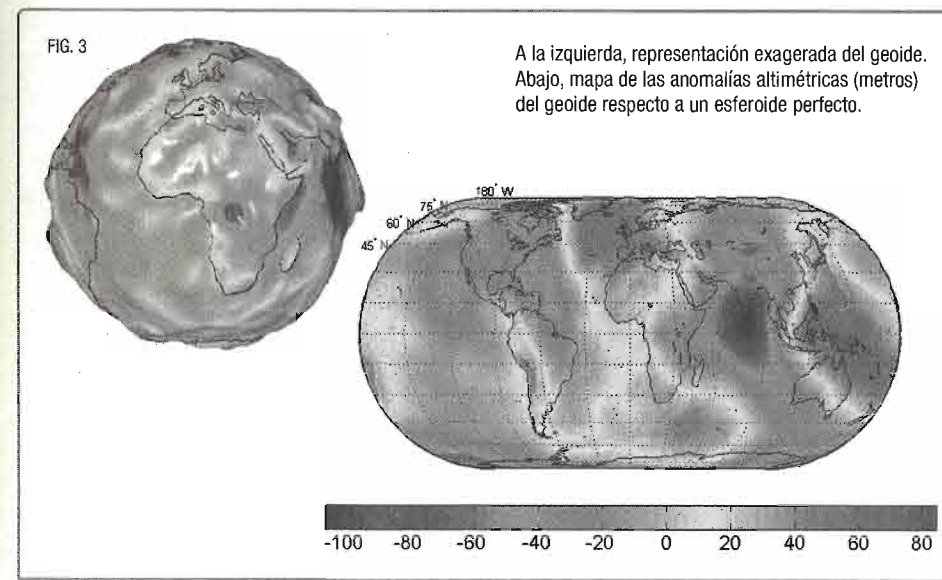
pre esta polaridad, que se ha invertido en multitud de ocasiones, dejando evidencias en la corteza, como veremos a continuación.

El manto: la capa más gruesa del planeta

El manto tiene un grosor de unos 2900 km y se extiende por encima del núcleo hasta la *discontinuidad de Mohorovicic*, zona de transición entre la corteza y el manto terrestre, situada a pocos kilómetros de la superficie. Su volumen y masa son, respectivamente, del orden del 85% y 70% del total terrestre. Su densidad disminuye desde los 5500 kg/m³ cerca del núcleo hasta los 3300 kg/m³ cerca de la corteza. Se estima que está formado básicamente por óxidos de silicio y magnesio, incluyendo también pequeñas cantidades de otros óxidos, como los de hierro, aluminio y calcio. En la parte más profunda, donde hay mayor presión y temperatura, el manto se encuentra en un estado sólido y presenta un comportamiento plástico, existiendo una zona de transición irregular con el núcleo externo de hierro fundido. A mayor distancia del núcleo, la temperatura y la presión disminuyen, a la vez que el manto adquiere mayor viscosidad. Sin embargo, en las últimas decenas de kilómetros bajo la corteza vuelve a ganar en rigidez, ya que allí la temperatura disminuye mucho más rápidamente que la presión. De acuerdo con los estudios sismológicos se pueden distinguir dos zonas con propiedades diferenciadas: el manto inferior y el manto superior. El inferior es relativamente homogéneo en cuanto a la propagación de las ondas, cuyas velocidades indican una densidad mayor que la del manto superior. Esta mayor densidad podría deberse simplemente a cambios en la estructura química o a una composición distinta con mayor contenido en hierro. Cada una de estas hipótesis tiene implicaciones en lo que respecta a la transmisión del calor del núcleo a la corteza. En el caso de una composición única pueden existir corrientes de convección que abarquen la totalidad del manto, mientras que en el caso de composiciones distintas, parece razonable suponer que existen corrientes de convección separadas. Sea como sea, el material que aflora en

ciertas partes de la superficie parece provenir de zonas muy profundas. La transición desde el manto inferior al superior no es sencilla, y existen distintas teorías según las cuales se situaría en una franja de cientos de kilómetros que podría empezar entre los 1000 o 700 km de profundidad. El manto superior presenta también una estructura compleja, con una transición irregular entre la zona próxima al manto inferior, parcialmente fundida, y la zona próxima a la corteza, de mayor rigidez.

Hemos visto que existen amplias zonas de transición irregulares entre capas de materiales con distintas densidades. Esto se puede percibir en la variación local del campo gravitatorio terrestre. En una configuración de capas donde predominan los materiales más o menos densos, el campo gravitatorio es respectivamente más o menos intenso. Por lo tanto, una superficie con la misma intensidad de campo gravitatorio presentará salientes sobre las zonas más densas y entrantes sobre las menos densas. Es el caso de la superficie que define el nivel del mar en los océanos, la cual se conoce como *geoide*, y es más parecida a un guisante arrugado que a uno liso (figura 3). Hay que decir que



las deformaciones del geoide son como máximo de poco más de 100 m de altura, dos órdenes de magnitud menos que el achatamiento de los polos. Uno de los esfuerzos más recientes para mapear el campo gravitatorio terrestre es la misión espacial conjunta entre la NASA y la Agencia Espacial alemana llamada GRACE (por *Gravity Recovery and Climate Experiment*), una misión que está dotada de dos satélites, apodados Tom y Jerry, que vuelan siguiendo una misma órbita y a 220 km el uno del otro. La distancia entre ambas naves sufre ciertas variaciones debido a las irregularidades del campo gravitatorio. El estudio de los datos obtenidos permite estimar la distribución de densidades en el manto y perfeccionar los modelos actuales.

La corteza: justo debajo de la superficie

Es la capa más externa de la Tierra y su profundidad puede variar entre los 5 km en los océanos y los 70 km en las partes más gruesas de los continentes. Si bien su volumen y masa son insignificantes en comparación al total de la Tierra, es la capa en la que el hombre realiza toda su actividad y también la más conocida. Está mayormente constituida por rocas que se han formado tras la solidificación del material fundido o magma emergido de las capas inferiores, y su densidad media oscila en torno a los 2800 kg/m³. El elemento más abundante en la corteza es el oxígeno (46,6%) seguido del silicio (27,7%) y de otros elementos como el aluminio, el hierro, el calcio, el sodio, el potasio o el magnesio, que están presentes en menor cantidad. Todos estos elementos aparecen en forma de compuestos, mayormente óxidos. El más abundante de ellos es la sílice SiO₂ (60,6%), seguido del óxido de aluminio Al₂O₃ (15%). Los óxidos de los otros elementos nombrados aparecen en cantidades menores. Dichos compuestos se agrupan formando minerales, y estos, a su vez, generan rocas, cuya composición varía dependiendo de su origen.

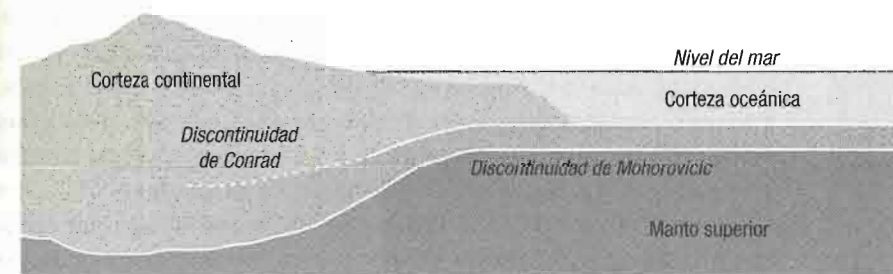
Existen básicamente dos tipos de corteza: la oceánica y la continental (figura 4). La corteza oceánica es la parte situada en los fondos oceánicos y su grosor medio oscila en torno a los

7 km. La corteza continental es la parte que constituye los continentes; su grosor medio es de unos 35 km, pudiendo llegar puntualmente a sobrepasar los 70 km. Las diferencias entre ambas van más allá de su grosor, ya que su proceso de formación e historia geológica son completamente distintos.

La corteza oceánica está en un proceso de constante renovación, y la antigüedad máxima de sus rocas es de tan solo unos pocos cientos de millones de años. La nueva corteza se genera por afloramiento de magma a lo largo de una amplia red de dorsales oceánicas que recorre los océanos, como veremos en el siguiente apartado. Este magma emerge a la superficie enfriándose rápidamente sin tener tiempo de formar grandes granos. Está mayormente constituida por basalto, una roca de origen profundo con contenido bajo en sílice (45%) y relativamente alto en compuestos con elementos pesados como el magnesio y el hierro. Su densidad de 3000 kg/m³ es mayor que la media de la corteza.

La corteza continental sufre más bien un proceso acumulativo, cuyas rocas más antiguas pueden tener miles de millones de años y un largo historial de transformaciones. La incorporación de magma a la corteza continental se produce básicamente de forma subterránea, enfriándose lentamente y dando lugar a

FIG. 4

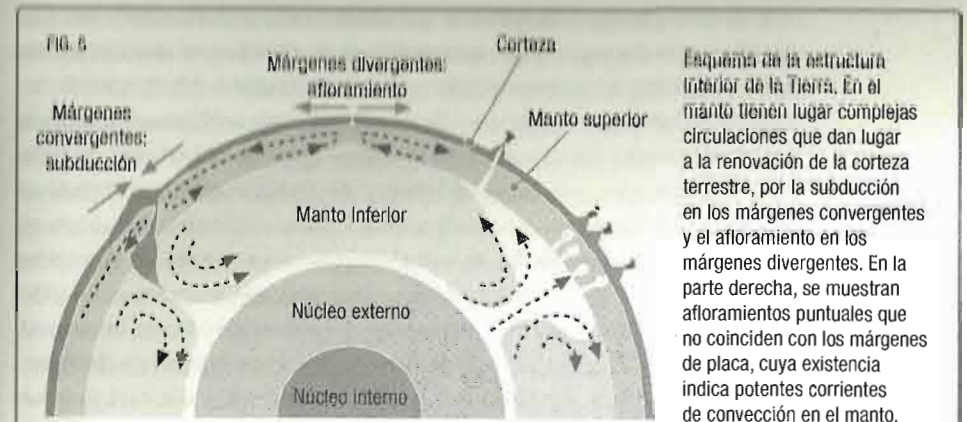


Esquema de los dos tipos de corteza: oceánica y continental. La corteza está separada del manto por la discontinuidad de Mohorovicic, y presenta también discontinuidades menores, como la de Conrad, que marca la transición entre la corteza granítica y la basáltica, la cual se observa solamente en determinadas zonas continentales.

la formación de grandes granos. Está constituida en su mayoría por granito, una roca de origen poco profundo con un alto porcentaje de sílice (75%) y un contenido relativamente bajo de átomos pesados en sus compuestos. Su densidad, de 2700 kg/m^3 , es menor que la media de la corteza.

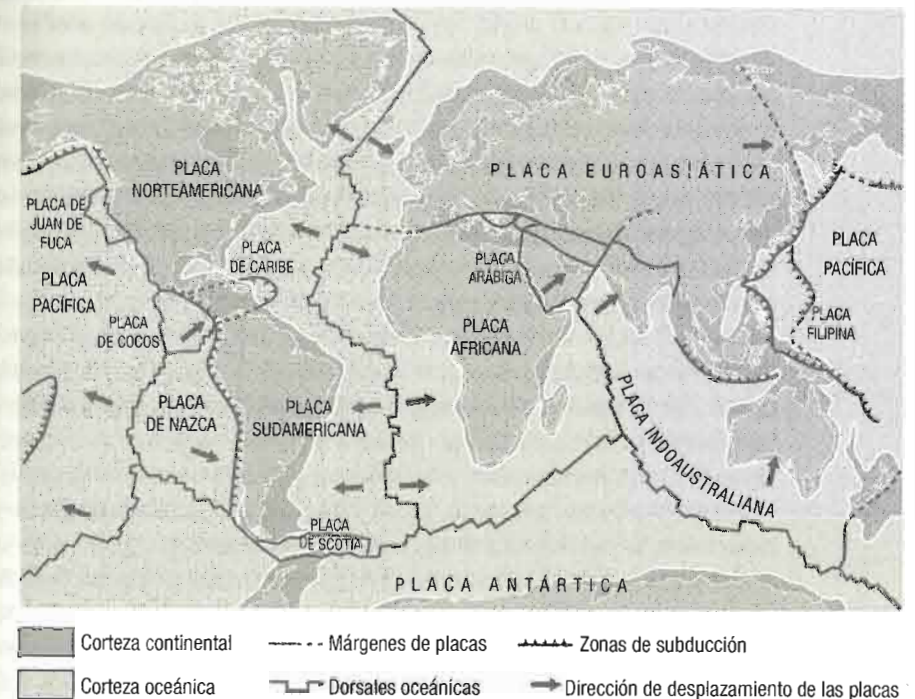
UN SUELO EN MOVIMIENTO: LAS PLACAS TECTÓNICAS

Los fenómenos sísmicos y volcánicos tienen su origen en el calor desprendido por el núcleo terrestre y las corrientes de convección en el manto (figura 5). Cuando esta energía llega a la corteza se desencadenan una serie de fuerzas que son también las responsables de los fenómenos orogénicos u orogenias. Y es que la corteza terrestre no es continua, sino que está dividida en fragmentos que, arrastrados por la parte superior del manto, se mueven conjuntamente como bloques rígidos. La capa que forman la corteza y la parte superior del manto, la litosfera, está compuesta por bloques rígidos que reciben el nombre de placas tectónicas. En las zonas donde las placas se separan tienen lugar fenómenos de afloramiento de material del manto, y donde se juntan, fenómenos de subducción de material de la corteza. El afloramiento es más intenso que la subducción, y la corteza ha ido aumentando su grosor a lo largo de la historia de nuestro planeta. Este fenómeno es debido a que sus materiales son difícilmente sumergibles en el manto por su menor densidad. Al ser menos densa que el manto, allí donde se ha acumulado y es más gruesa, sobresale, formando los continentes. Las placas tectónicas pueden estar formadas conjuntamente por corteza oceánica y continental. Se han identificado unas quince placas principales (figura 6), cuyo tamaño varía desde unos pocos millones hasta decenas de millones de kilómetros cuadrados. Los márgenes de las placas recorren la superficie terrestre como las costuras de un balón de fútbol, concentrando la mayor parte de la actividad sísmica, volcánica y orogénica de la superficie. Pueden ser divergentes, transformantes o convergentes, según si las placas se separan, se deslizan lateralmente o se juntan.



Esquema de la estructura interior de la Tierra. En el manto tienen lugar complejas circulaciones que dan lugar a la renovación de la corteza terrestre, por la subducción en los márgenes convergentes y el afloramiento en los márgenes divergentes. En la parte derecha, se muestran afloramientos puntuales que no coinciden con los márgenes de placa, cuya existencia indica potentes corrientes de convección en el manto.

FIG. 6



Esquema de la distribución de las placas tectónicas en la superficie terrestre. Se detallan los desplazamientos relativos entre placas y los distintos tipos de márgenes.

Los márgenes divergentes acostumbran a coincidir con las dorsales oceánicas en el centro de los océanos por donde aflora nueva corteza. Una excepción es el Gran Valle del Rift, una fractura geológica de 4830 km de longitud que está empezando a fracturar la placa africana por el este y que, de seguir así, puede dar lugar a un nuevo océano dentro de varios millones de años. Las dorsales oceánicas se levantan un par de kilómetros sobre el fondo de los océanos, formando una red sumergida de decenas de miles de kilómetros. Las placas pueden separarse a razón de entre 20 y 200 mm al año. La corteza es más joven en la dorsal más reciente y más antigua en las partes más alejadas de esta. El magma recién expulsado contiene minerales férricos que se alinean con el campo magnético terrestre antes de solidificar. Las distintas bandas con sentidos alternos de orientación magnética que existen a cada uno de los lados de la dorsal son uno de los principales indicadores de que el campo magnético terrestre ha invertido su polaridad en distintos periodos geológicos. Los márgenes transformantes (los bordes entre una placa tectónica y otra) aparecen habitualmente en combinación con los divergentes, formando márgenes escalonados. Normalmente se encuentran vinculados también a las dorsales oceánicas, siendo la falla de San Andrés, que recorre el oeste de Estados Unidos, la más notable excepción.

Por su lado, los márgenes convergentes pueden involucrar tanto corteza oceánica como continental, lo que produce resultados distintos según el caso. Si, por ejemplo, hay una de cada, la corteza oceánica sufrirá una subducción bajo la continental, debido a que la primera es más densa que la segunda. Esta configuración puede dar como resultado altas cadenas montañosas, como los Andes, donde coexiste la actividad sísmica y la volcánica. En el caso de márgenes convergentes con corteza oceánica a ambos lados, la subducción se producirá bajo el agua, y se generarán fosas oceánicas como la de las Marianas. Finalmente, en el caso de márgenes convergentes con corteza continental a ambos lados, las masas de tierra se fusionarán formando un único continente, originando importantes procesos orogénicos acompañados de episodios sísmicos pero no volcánicos. Este es

el caso de las cadenas montañosas del Himalaya y el Karakórum, surgidas tras la colisión del subcontinente indio con el continente asiático, exponentes máximos de la orogenia Alpina que se extiende hasta Europa. Aparte de las orogenias Andina y Alpina, activas aún a día de hoy, se tiene constancia de otras orogenias anteriores, como la Laramide y la Varisca o Herciniana. La orogenia Laramide, que actuó hasta hace unas pocas decenas de millones de años, es la responsable de la aparición de las Montañas Rocosas en América del Norte. La Varisca, que tuvo lugar hace cientos de millones de años, detonó la formación del gran continente Pangea.

GEOLOGÍA: LO QUE LAS ROCAS NOS CUENTAN

En un sentido amplio, la palabra «geología» define el estudio de la Tierra, aunque aquí trataremos la acepción que se refiere a las características de las rocas y las estructuras que constituyen. Las rocas son los sólidos cohesionados, formados por uno o varios minerales, que conforman la litosfera. Según como se hayan formado se pueden clasificar en tres grandes grupos: rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las rocas ígneas se forman al solidificar el magma y, como ya hemos visto, constituyen la mayor parte de la corteza terrestre. Si solidifican tras aflorar a la superficie, como el basalto de la corteza oceánica, se llaman *rocas extrusivas* y si lo hacen bajo la superficie, como el granito de la corteza continental, se llaman *rocas intrusivas*. Cualquiera de los dos tipos puede verse expuesto a los fenómenos atmosféricos tras procesos orogénicos, pudiendo ser erosionadas y disgregarse en pequeños fragmentos, proceso que recibe el nombre de *meteorización*. En el caso del basalto, ocurre por oxidación ya que contiene un porcentaje significativo de hierro, y en el caso del granito, ocurre por hidrólisis cuando entra en contacto con el agua de lluvia. Las pequeñas fracciones de estas y otras rocas son transportadas por el agua o el viento a cuencas donde se depositan en forma de sedimentos. Las rocas sedimentarias se forman por acumulación y transformación de materia-

les en una de las cuencas sedimentarias. La propia variedad de los procesos por los cuales esto puede suceder hace que exista una gran diversidad de este tipo de rocas. Por ejemplo, existen rocas generadas por actividad biológica, como las calcáreas y los carbonos. Las calcáreas están compuestas principalmente de carbonato cálcico (CO_3Ca) y se originan por acumulación de es-

queletos de organismos en entornos acuáticos. Los carbonos, muy ricos en carbono, se originan por descomposición de vegetales terrestres en entornos acuáticos poco profundos. También existen rocas generadas por precipitación química de multitud de diversos compuestos, disueltos

en masas de agua que se evaporan. Finalmente, las rocas metamórficas se forman a partir de rocas sedimentarias o ígneas, tras sufrir un proceso de transformación por exposición a altas presiones o temperaturas. Estas condiciones pueden darse en las capas profundas de rocas sedimentarias o en los entornos alrededor de rocas ígneas intrusivas. Una roca metamórfica puede fundirse por subducción en el manto, aflorando de nuevo como roca ígnea o meteorizarse por exposición a la erosión, depositándose de nuevo como roca sedimentaria. Es lo que se conoce como ciclo de las rocas, que puede durar millones de años.

Hemos tratado en apartados anteriores las condiciones de subducción y afloramiento que dan lugar a las rocas ígneas y algunas metamórficas. En cuanto a las rocas sedimentarias, se disponen horizontalmente formando distintas capas que reciben el nombre de estratos (véase la imagen superior de la pág. 101). Estos estratos pueden sufrir grandes deformaciones presentándose en disposiciones muy distintas a la original. La ciencia que estudia cómo se originaron recibe el nombre de estratigrafía. Existen dos aproximaciones básicas: la que estudia la línea vertical que marca el orden cronológico y la que estudia el plano horizontal, que marca el ambiente en el que se produjo la sedimentación. En cuanto a la línea vertical, se puede establecer una sucesión cronológica de estratos

Las bacterias mineralizaron las rocas, depositaron el hierro. Construyeron la geología que hoy vemos.

BONNIE BASSLER, BIÓLOGA MOLECULAR

DATACIÓN RELATIVA

La datación relativa se basa en la comparación de eventos entre los que existe una relación de anterioridad y de posterioridad en el tiempo. Esta antigüedad relativa se puede establecer de acuerdo a los siguientes principios simples, que se terminaron de establecer en el siglo XIX.

Principio de superposición

En una sucesión estratificada no deformada, las capas más recientes se encuentran en posición superior a las más antiguas.

Principio de relaciones de corte

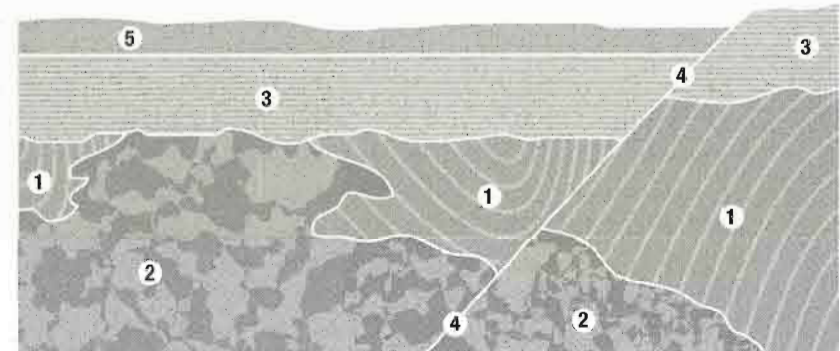
Si un cuerpo de roca corta a otro, el primero es más reciente que el segundo. Permite relacionar en el tiempo diversos episodios geológicos como pliegues, fallas o intrusiones. Por ejemplo, las rocas intrusivas son anteriores a las rocas que las confinan.

Principio de inclusión

Si un cuerpo de roca incorpora fragmentos de otro, el primero es más reciente que el segundo. Esto se explica porque el cuerpo más antiguo puede haber meteorizado parcialmente mientras se estaba formando el más reciente.

Principio de la sucesión de fósiles

La edad relativa de las rocas puede ser determinada por su contenido en fósiles. Esto es así porque existen especies que pueden habitar amplias zonas de la superficie terrestre en determinadas ventanas de tiempo, fosilizando en lugares y tipos de roca distintas.



Esquema que muestra la datación relativa de varios eventos geológicos. El orden cronológico es: 1) sucesión de estratos deformados en pliegue, 2) rocas intrusivas, 3) nuevos estratos sedimentarios, 4) falla y 5) erosión.

con la ayuda de los fósiles que aparecen en ventanas de tiempo concretas, algunos en múltiples tipos de rocas generadas en ambientes distintos. Teniendo en cuenta estos fósiles se puede establecer una datación relativa de los distintos estratos. Para dataciones absolutas hay que recurrir a la datación radiométrica de ciertos estratos cuya sedimentación se pueda vincular a fenómenos con un porcentaje conocido de algún elemento radiactivo. Actualmente se cuenta con una escala de tiempo geológica que abarca toda la historia de nuestro planeta, como veremos más adelante. En cuanto al plano horizontal, las rocas presentan características distintas en función del ambiente en el cual fueron sedimentadas. Estudiando las características de las rocas sedimentadas en un mismo tiempo se puede reconstruir la geografía de tiempos geológicos pasados, permitiendo, por ejemplo, determinar las áreas ocupadas por continentes y océanos.

En la configuración geológica de la superficie terrestre actúan tanto las fuerzas internas, responsables de la orogénesis, como las capas fluidas sobre la superficie, responsables de la erosión. Por un lado, las fuerzas orogénicas deforman los estratos dispuestos originariamente en horizontal, que se doblan, giran y fragmentan dando lugar a formaciones geológicas como los plegamientos y las fallas (véanse las imágenes central e inferior de la página contigua). Los plegamientos presentan una curvatura que no se ha llegado a fracturar, mientras que las fallas presentan una fractura con un desplazamiento relativo de las partes a ambos lados. Ambas estructuras pueden presentarse a nivel muy local o alcanzar longitudes de cientos de kilómetros. Por otro lado, las fuerzas erosivas acaban de moldear el terreno, dejando al descubierto las formaciones geológicas. Uno de los factores erosivos más potentes es el agua de la lluvia, ya que es un magnífico disolvente capaz de transportar todo tipo de sustancias que reaccionan con las rocas, disgregándolas poco a poco. También actúa por dilatación térmica cuando se queda apresada en una grieta y se congela, dado que el agua tiene la propiedad de aumentar su volumen cuando se solidifica; por consiguiente, al congelarse en una grieta somete a la roca a tensiones que la frag-



Arriba, materiales estratificados de roca arenisca en el Antelope Canyon (cañón del Antílope), en el suroeste de Estados Unidos. En el centro, un plegamiento de una orogenia antigua en el fiordo King Oscar de Groenlandia. Abajo, la falla de San Andrés, que cruza el estado de California a lo largo de 1 300 km.

mentan aún más. Existen también otros fenómenos erosivos, como el viento. Todos estos fenómenos atmosféricos disgregan los grandes bloques de tierra levantados por las fuerzas internas y los transportan a sitios más bajos por efecto de la gravedad, lo que tiende a aplanar de nuevo los paisajes.

Sobre la superficie: las capas fluidas

Cada vez que contemplamos las gotas de agua caer desde el cielo en un día lluvioso, presenciamos uno de los fenómenos más extraordinarios sobre nuestro planeta. La Tierra es el único astro del sistema solar con grandes cantidades de agua líquida en su superficie y, de momento, el único astro conocido con estas características.

Desde el espacio, la Tierra muestra un color azulado que le ha valido el nombre de «planeta azul». Este color es conferido por la superficie de agua líquida, que cubre casi tres cuartas partes de su superficie. Esta es una de las mayores singularidades de nuestro planeta, que lo hace único en el sistema solar. Solamente en el satélite Titán de Saturno se han identificado grandes cantidades de líquido en la superficie y resultaron ser hidrocarburos. Se da por sentado que existen otros sistemas estelares con planetas cuyas superficies albergan también grandes cantidades de agua líquida. Sin embargo, a día de hoy la Tierra sigue siendo el único en el que se sabe a ciencia cierta que esto es así. En este hecho tiene una gran importancia la distancia de la Tierra respecto al Sol. Si estuviera más cerca y recibiera más radiación, el agua se evaporaría, y si estuviera más lejos y recibiera menor radiación, se congelaría. Existen también otros condicionantes para la existencia de agua líquida en la superficie. Por ejemplo, la existencia de la envoltura gaseosa que preserva y reparte el calor, al mismo tiempo que protege el agua de una excesiva radiación. También tiene un papel importante la existencia de la magnetosfera, el campo magnético terrestre que la protege del viento solar.

Las capas de agua líquida y gases que envuelven la superficie sólida terrestre son conocidas respectivamente como hidrosfera y atmósfera. Su dinámica e interacción son las principales causas de los procesos erosivos que vuelven a allanar los relieves orogénicos. Esta dinámica está fuertemente marcada por la energía solar, responsable de la evaporación del agua y del calentamiento de las masas de aire. Por un lado, las masas de aire caliente se expanden, modificando su equilibrio, lo que provoca que estén circulando constantemente en busca de uno nuevo. Por otro lado, el agua evaporada es transportada por la circulación atmosférica hasta que se enfría, condensa y precipita, volviendo la mayor parte de ella a océanos y mares, ya sea directamente o a través de los ríos y sus sistemas fluviales. Es lo que se conoce como ciclo del agua y es uno de los factores más importantes en el modelaje de los paisajes terrestres.

Comprender las propiedades de la hidrosfera y la atmósfera nos ayuda también a conocer las condiciones que han permitido el desarrollo de la vida. Ambas contribuyen a la moderación de la temperatura terrestre absorbiendo o liberando calor, reduciendo así las diferencias térmicas diarias y estacionales. La hidrosfera, además, es imprescindible para la vida tal como la conocemos, ya que todos los seres celulares están compuestos mayormente de agua. El hecho de que sea un buen disolvente de sustancias facilita una serie de reacciones químicas esenciales en el desarrollo de la vida. Además, esta última no habría podido aparecer sin la protección a la radiación solar que supusieron originalmente los océanos. Actualmente, en la protección de la vida fuera de los océanos juegan también un papel fundamental la atmósfera y la magnetosfera.

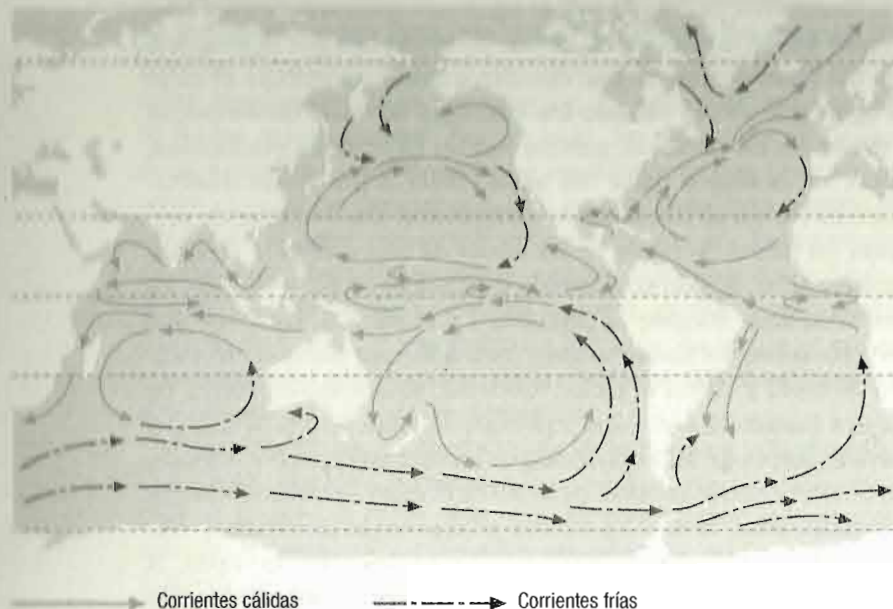
EL DOMINIO DEL AGUA: LA HIDROSFERA

La hidrosfera es la capa de agua que discurre sobre la superficie de la Tierra y por parte del subsuelo. La mayor parte del agua se encuentra en estado líquido en los océanos y mares. El resto se halla contenida, mayoritariamente, en los grandes volúmenes

de hielo que se concentran alrededor de los polos. Los ríos y sus sistemas fluviales representan tan solo una parte muy pequeña de la hidrosfera, la cual recoge el agua precipitada sobre los continentes desde la atmósfera, donde se incorpora por la evaporación del agua oceánica. Ese circuito natural constituye el ciclo del agua y se cierra cuando los sistemas fluviales desembocan de nuevo en los océanos, aunque esa no es la única posibilidad. De hecho, la mayor parte del agua vuelve a precipitar directamente en forma de lluvia sobre los océanos. También puede precipitar en forma de nieve en las zonas de alta montaña o en las latitudes altas, donde se acumula durante el otoño y el invierno para derretirse durante la primavera y el verano. La nieve que precipita sobre las zonas polares pasa a formar parte de su volumen de hielo y cierra el ciclo, volviendo al océano en forma de grandes masas de hielo: los icebergs. El agua de los océanos y mares acumula un alto contenido de sales disueltas procedentes mayormente de los fondos, pero no es el caso del resto del agua de la hidrosfera, la cual se somete a un proceso de evaporación y precipitación. Esa diferencia establece dos tipos de agua, la salada, y la que, por contraposición, llamamos agua dulce. De toda el agua de la hidrosfera tan solo un 2,5% es dulce y, de esta última, dos terceras partes corresponden a los hielos polares.

La dinámica hídrica en los océanos

El agua de los océanos, que constituye la mayor parte de la hidrosfera, no permanece estática sino que existen corrientes a través de las cuales puede circular por todo el planeta. Estas corrientes están totalmente condicionadas por el movimiento de rotación terrestre y por la morfología de los continentes. Concretamente, las masas de agua presentan una tendencia general al giro en dirección contraria a la rotación terrestre. Este fenómeno, conocido como *efecto Coriolis*, tiene que ver con la inercia y hace que las masas de agua superficiales tiendan a girar en sentido horario en el hemisferio norte y en sentido antihorario en el hemisferio sur. Esto genera corrientes de agua cálida pro-



Mapa de las principales corrientes oceánicas superficiales que presentan una circulación en sentidos distintos en ambos hemisferios, por el efecto Coriolis. En las costas orientales de los continentes, las corrientes acostumbran a ser cálidas al proceder de la zona ecuatorial, mientras que en las costas occidentales suelen ser frías, ya que se originan en las zonas polares.

cedentes de la zona tropical en las costas orientales de los continentes y corrientes de agua fría procedente de las zonas polares en las costas occidentales (figura 1). En el océano Antártico, más al sur de las circulaciones antihorarias superficiales, existe una franja oceánica por donde circula una corriente en sentido horario alrededor de la Antártida. Esta corriente discurre por la superficie y también a nivel profundo y se mantiene bajo el hielo durante el invierno. En este entorno se da un trasvase de agua superficial a capas profundas, desde donde es transportada a las zonas tropicales. Las corrientes profundas son menos conocidas que las superficiales y tienen comportamientos distintos, según

EL EFECTO CORIOLIS

El efecto Coriolis fue inicialmente descrito por el científico francés Gaspard-Gustave Coriolis en la primera mitad del siglo *xx*. Este ingeniero y matemático francés estaba especializado en el estudio de la dinámica del giro de las máquinas. La idea subyacente del efecto Coriolis es que, si consideramos dos sistemas de referencia con una aceleración relativa entre ambos, los objetos tendrán aceleraciones distintas según el sistema que consideremos.

La rotación de la Tierra

Si tomamos cualquier sistema de referencia sobre la superficie terrestre, observaremos que este está acelerado respecto al resto del universo debido a la rotación que presenta nuestro planeta. Es por ello que todos los objetos sobre la superficie terrestre presentarán una tendencia al giro en sentido contrario a esta rotación. Veamos cómo funciona el efecto Coriolis con el ejemplo de una plataforma rotante en sentido antihorario, sobre la cual hay dos personas que se pasan una pelota, tal como muestra la figura. La plataforma rotante hace el papel de la Tierra, y el suelo bajo ella, el del resto del universo. La pelota tenderá a mantener el componente horizontal de su velocidad respecto al suelo, y las personas sobre la plataforma verán cómo presenta una tendencia a rotar en sentido horario.



Esquema que presenta el desplazamiento de una pelota lanzada desde el centro de una plataforma rotante. Se muestra dos veces la misma sucesión de posiciones de la pelota tomando distintos sistemas de referencia: arriba la referencia es el suelo bajo la plataforma y, abajo, solo esta última. Vista desde la plataforma, la pelota presenta una tendencia al giro.

el océano en el que se encuentren. En los océanos Pacífico e Índico parte del agua profunda vuelve a la superficie en las zonas tropicales. El caso del Atlántico es algo distinto, ya que es el único conectado por aguas profundas con el océano Ártico, donde también existe hundimiento de agua superficial. Esto posibilita la existencia de una corriente profunda que trasvasa agua desde el océano Ártico hasta el Antártico.

El intercambio entre el agua superficial y la profunda viene determinado básicamente por sus densidades, que varían en función de su temperatura y contenido en sales. Es por ello que la circulación global superficial-profunda recibe el nombre de *circulación termohalina*. El hundimiento del agua superficial por densificación en las zonas polares y tropicales se da por dos factores principales. El primero es la evaporación, que provoca la mayor concentración salina del agua restante. El segundo es el enfriamiento, que en las zonas tropicales ocurre de noche y se combina con la elevada evaporación. Respecto al enfriamiento, el agua oceánica no se convierte en hielo a 0 °C, sino que eso ocurre aproximadamente a -2 °C, debido a las sales disueltas. Esto solo sucede en la superficie, ya que el hielo es menos denso que el agua y forma una película. Del mismo modo, los cambios de temperatura provocados por la radiación solar y la interacción con la atmósfera se concentran también en la zona superficial. Parece que el agua de los fondos oceánicos tiende a ser más homogénea y estática que la superficial, con una temperatura próxima a la de su punto de congelación debido a las sales disueltas. De todas formas, lo que sucede en los fondos oceánicos no se conoce completamente y los modelos son susceptibles de ser mejorados en el futuro.

Restos de coberturas glaciales ancestrales

En cuanto al hielo acumulado en los polos, la mayor parte se encuentra sobre la Antártida, en el polo sur. Este continente tiene las temperaturas y la humedad relativa más bajas de todo el planeta, pues está cubierto por una gran masa de hielo perma-

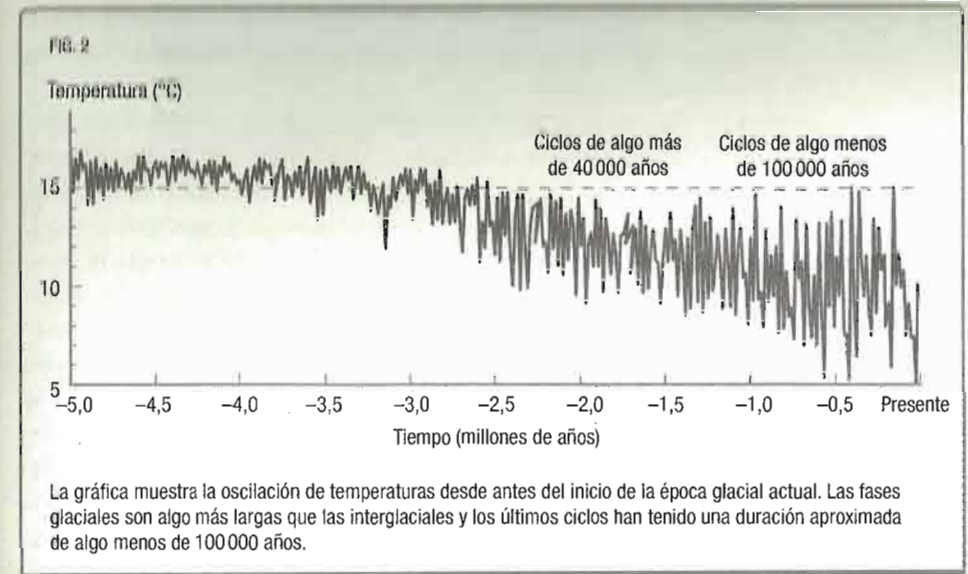
nente que incluso supera sus límites en ciertas zonas. Con una media de dos kilómetros de grosor, supone aproximadamente el 80% de las reservas de agua dulce del planeta. A su alrededor, el océano glacial Antártico se cubre cada invierno con una extensa capa de hielo estacional. El caso del polo norte es distinto. El Ártico es básicamente un océano helado y no un continente. Cubierto por una capa de hielo de pocos metros, es una de las grandes reservas de hielo del hemisferio norte, concentrada en la cercana isla de Groenlandia. Precisamente en las cercanías de esta gran isla es donde se concentra el núcleo de hielo más antiguo y persistente del océano Ártico. En cuanto al resto de la capa de hielo ártico, se ha observado un retroceso de la superficie en las últimas décadas. Hay que decir que, aunque se fundiera por completo, esto no contribuiría al aumento del nivel del mar, ya que se trata de hielo flotante que, al convertirse en agua, ocuparía el mismo volumen que la parte sumergida. Lo que sí contribuiría al aumento del nivel del mar sería una pérdida de hielo importante en las grandes masas de Groenlandia o la Antártida. Estudios recientes que combinan mediciones altimétricas de varios satélites muestran que es el caso de Groenlandia, pero no de la Antártida, que está ganando hielo. Parece ser que la pérdida de hielo total supera a la ganancia, pero se desconoce con precisión en qué medida. Según las mediciones realizadas en las costas de todo el mundo, el nivel del mar ha aumentado en el último siglo más de diez centímetros. Al parecer las mediciones por satélite confirman que este aumento se sitúa en unos milímetros anuales. De todas formas, este aumento no es solo atribuible a la pérdida de hielo sino que existen otros factores, como por ejemplo un posible aumento de la temperatura superficial del océano, que habría sido del orden de una décima de grado centígrado. Puede que estas variaciones, como veremos en el apartado siguiente, estén ocasionadas por la actividad humana y puede también que tengan consecuencias imprevisibles.

Más maravillosa que la sabiduría de los ancianos y la contenida en los libros es la sabiduría secreta del océano.

H.P. LOVECRAFT

Por ejemplo, un aporte masivo de agua dulce por derretimiento del hielo en Groenlandia podría provocar una modificación de la circulación termohalina.

En la historia de la Tierra se han dado oscilaciones en las masas de hielo polares mucho más importantes que la que pueda estar causando el ser humano en este momento, y en ocasiones el nivel del mar ha estado más de cien metros por debajo del actual. Se tiene evidencia de varias épocas glaciales en la historia de la Tierra durante las cuales las masas de hielo polares han contado con mayores volúmenes y extensiones. La primera época glacial tuvo lugar hace miles de millones de años. La última está teniendo lugar desde hace unos dos millones y medio de años, aunque actualmente nos encontramos en una fase de tregua interglacial. Las fases glaciales más y menos frías que se han sucedido dentro del periodo actual han dejado evidencias que se pueden detectar. Por ejemplo, las precipitaciones anuales de nieve de los últimos cientos de miles de años han quedado registradas en las capas de hielo que recubren Groenlandia y la Antártida. Analizando químicamente las muestras de hielo en profundidad obtenidas en esas capas, se pueden relacionar con los registros de sedimentos marinos que indican el nivel del mar. Este análisis da una idea de las oscilaciones de temperatura que han existido durante la época glacial actual, estimados en una decena de grados centígrados. Estas oscilaciones muestran una periodicidad bastante regular (figura 2), lo que se puede relacionar con ciclos en los movimientos orbitales y rotacionales de la Tierra. Parece que las fases glaciales coinciden con una mayor inclinación del eje de rotación que distorsionaría los patrones estacionales. Para saber por qué estas oscilaciones solo tienen lugar durante la época glacial actual y no antes, tendríamos que entender por qué tienen lugar las épocas glaciales. Se trata de una cuestión abierta, pero todo indica que otros factores, como la distribución de continentes y océanos, tienen mucho que ver. Una distribución distinta de las masas de agua oceánicas variaría la cantidad de radiación solar recibida, así como la energía absorbida, además de la configuración de las corrientes que la distribuyen.

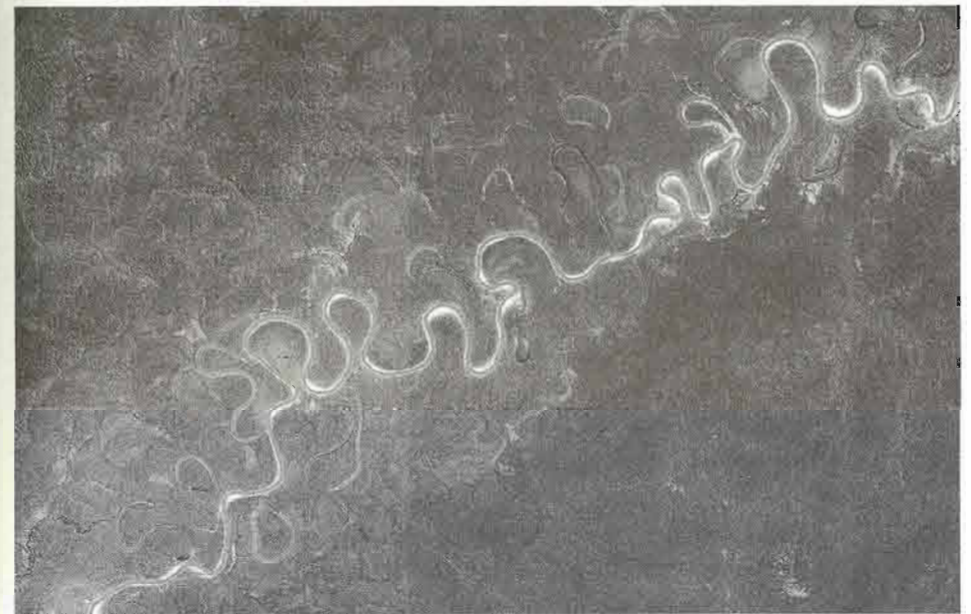
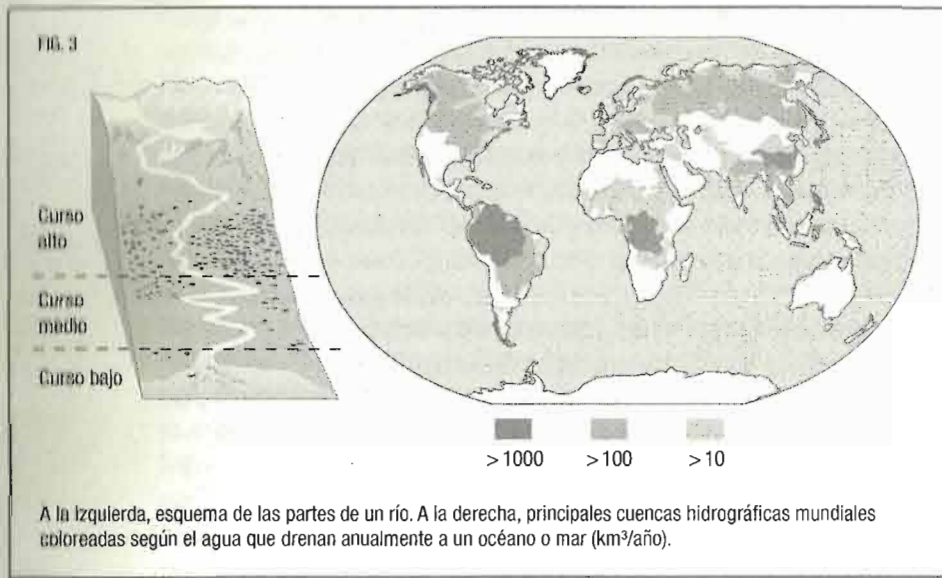


La circulación del agua: entre el cielo y la tierra

En cuanto al ciclo del agua, nos centraremos aquí en el agua que precipita sobre los continentes, que aunque representa una parte muy pequeña de la hidrosfera, es esencial para la vida. Históricamente el ser humano ha tendido a concentrar su actividad allí donde puede encontrarla con abundancia. Esto incluye el agua que fluye por la superficie a través de los ríos a océanos y mares, pero también la que forma parte del subsuelo. De hecho, la mayor parte del agua que precipita sobre los continentes es absorbida por el terreno y pasa a formar parte de las aguas subterráneas. El nivel superior del agua subterránea se denomina *nivel freático* y está relacionado con los acuíferos, es decir, las formaciones geológicas permeables por donde el agua circula o se almacena. Pueden ser tanto estratos no cementados con granulometría superior a la coloidal (que reacciona con las moléculas de agua) como determinadas formaciones volcánicas y rocas porosas o fracturadas, como las calcáreas. En este último caso, al estar formadas por minerales solubles en agua, se pueden pro-

ducir cuevas con formas muy características, lo que se conoce como fenómenos cársticos. Tanto el agua de los acuíferos como la de los ríos que transcurren por la superficie tienen un ciclo estacional, contando con más agua en primavera cuando la mayor parte de la nieve y el hielo acumulado en las montañas se funde.

Los ríos se pueden clasificar en distintos tramos a lo largo de su trayecto, los cuales presentan distintas características (figura 3). Todos nacen en zonas montañosas donde el agua aparece en múltiples cursos, circulando a alta velocidad (véase la imagen superior de la página contigua). Este tramo se conoce como *curso alto* y destaca por la erosión que moldea los valles en forma de V, originando pendientes laterales muy pronunciadas. Cuando el agua prosigue su camino, confluye con otros cursos provenientes de varias zonas montañosas en zonas más llanas, donde disminuye progresivamente de velocidad. En este tramo, denominado *curso medio*, es importante el transporte de los materiales erosionados, aunque la erosión sigue actuando, pero en menor medida, generando anchos valles con terrazas y meandros (imagen inferior de la página contigua). Finalmente, los ríos acostumbran



Arriba, curso alto de un río en los Apalaches. Abajo, imagen de las terrazas y meandros del Yuruá, un afluente del río Amazonas.

a desembocar en un océano o mar donde se junta toda el agua en un único curso que circula a baja velocidad. Este tramo se conoce como *curso bajo*, durante el cual la sedimentación puede dar forma a extensos deltas. La zona que drena el agua precipitada en forma de lluvia o nieve a través de un mismo río a un océano, mar o lago aislado, recibe el nombre de *cuenca hidrográfica* (en la figura 3 podemos ver las principales del mundo). Las de color más oscuro corresponden a los ríos que vierten al mar más de mil kilómetros cúbicos de agua por año. Estos son, de más a menos caudalosos: el Amazonas (con más del doble de caudal que los otros tres juntos), el Congo, el Orinoco y el Yangtsé.

LA ATMÓSFERA: NUESTRA CAPA DE GAS VITAL

La atmósfera es la capa formada por la mezcla de gases que rodea la Tierra, constituida básicamente por un 78% en volumen de nitrógeno y un 21% de oxígeno, elementos esenciales para la vida. El nitrógeno forma parte de los aminoácidos y nucleótidos, bloques esenciales de las proteínas y ácidos nucleicos (ARN y ADN), mientras que el oxígeno es esencial para el ser humano y muchos otros seres vivos que lo utilizan para obtener energía de los nutrientes que ingieren. Pero la composición de la atmósfera no ha sido siempre como en la actualidad, pues ha sufrido cambios a lo largo de la historia de nuestro planeta. Por ejemplo, el oxígeno atmosférico tiene origen biológico y no ha existido siempre. Apareció por primera vez hace miles de millones de años como consecuencia de la actividad fotosintética de las cianobacterias y ha ido variando su concentración. En los últimos cientos de millones de años su porcentaje ha oscilado entre un 10% y un 35%.

Existen también en la atmósfera trazas de otros gases, algunos de los cuales, como el vapor de agua y el dióxido de carbono, son esenciales para conservar el calor mediante el efecto invernadero. Gracias a este efecto, la radiación solar es absorbida por ciertas moléculas que la transforman en energía cinética, es decir, en calor. Se estima que sin los gases de efecto invernadero la temperatura media de la atmósfera estaría entre diez y veinte grados

bajo cero. El más importante de estos gases es el vapor de agua, cuyo porcentaje medio en volumen es variable, oscilando entre un 0,4% y un 4%. En cuanto al dióxido de carbono, su porcentaje actual está en torno al 0,04%, habiendo aumentado en casi un 50% debido a la actividad humana. Se cree que este aumento, especialmente intenso en el hemisferio norte, está afectando a la temperatura media de la parte de la atmósfera más cercana a la superficie, estimada en torno a los 15 °C. Durante el siglo xx esa temperatura se ha incrementado más o menos un grado centígrado. El aumento se ha moderado en lo que llevamos de siglo xxi, aunque no parece que sea por una corrección en la actividad humana, ya que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera está en un máximo. Se cree que el motivo de esta moderación es el descenso de la radiación solar, que estaría compensando temporalmente los efectos del calentamiento global provocado por la actividad humana. Habrá que estar atentos durante las próximas décadas para ver cómo evolucionan las temperaturas, tener una idea más precisa de lo que está sucediendo y calibrar el impacto real de nuestra actividad.

Distinta distribución de gases, distintas capas

La atmósfera se puede dividir en varias capas, siendo la *troposfera* la más cercana a la superficie. Esta constituye las tres cuartas partes de la masa atmosférica total y su grosor varía desde unos veinte kilómetros en los trópicos hasta unos siete en las zonas polares. Es en la troposfera donde tienen lugar la mayor parte de los fenómenos asociados a las corrientes de convección provocadas por la radiación solar. El mecanismo básico de las corrientes consiste en que, al calentarse la superficie por la incidencia de la radiación, también se calienta el aire cercano, que asciende y es sustituido por aire más frío. De hecho, el mecanismo es algo más

El cambio climático es la mayor amenaza para nuestro futuro. Somos la primera generación que siente sus consecuencias y la última que tiene la oportunidad de hacer algo para detenerlo.

BARACK OBAMA

EL CALENTAMIENTO GLOBAL

Hoy en día, poca gente se atreve a dudar de la existencia de un calentamiento global que afecta a la troposfera. Lo cierto es que la temperatura tomada en la superficie ha sufrido un aumento estimado de en torno a un grado centígrado durante el siglo xx. También es cierto que este tipo de oscilaciones vienen produciéndose desde mucho antes y es posible que ni tan siquiera estemos en el máximo de los últimos cinco mil años. De todas formas, la comunidad científica afirma que el incremento actual está provocado por la actividad humana, aunque no se puede saber con exactitud en qué medida. Para calcular la variación de la temperatura y determinar hasta qué punto es responsable de ello la actividad humana, se está realizando un inmenso trabajo de recopilación y análisis de datos a nivel internacional. Se trata de un gran esfuerzo conjunto de coordinación entre organismos de distinta naturaleza, incluyendo desde agencias espaciales como la NASA o la ESA hasta redes de observatorios meteorológicos locales.

¿Cómo se mide la temperatura de la Tierra?

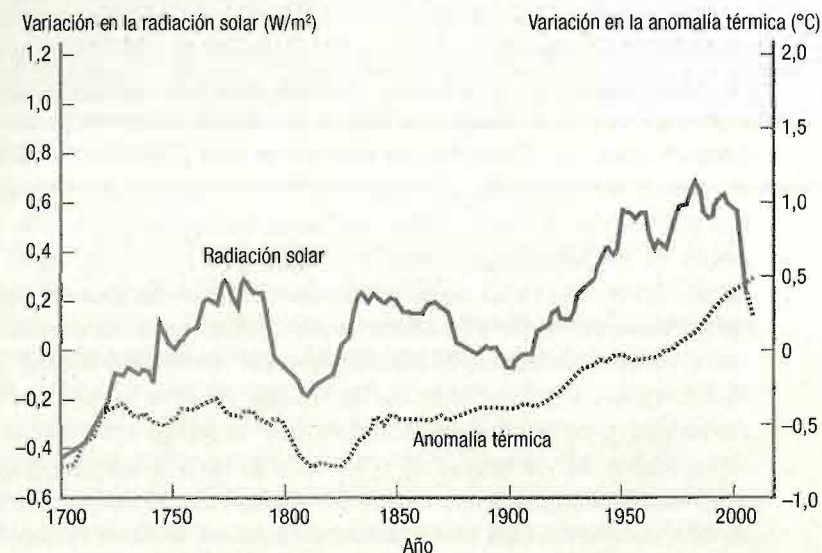
Actualmente, disponemos de varios satélites que miden la radiación electromagnética emitida por la parte de la atmósfera más cercana a la superficie. Obtener la temperatura a partir de estas mediciones no es sencillo y se necesitan elaborados modelos teóricos. Además, las mediciones de los distintos satélites deben ser tratadas separadamente según sus características. Por todo ello, determinar con precisión la temperatura del planeta en un momento concreto es prácticamente imposible, así que simplemente se calculan las tendencias de cambio. Además, solo se tienen datos por satélite de las últimas cuatro décadas, siendo menos completos cuanto más atrás en el tiempo. Para las décadas anteriores, se usan las anomalías medidas en estaciones meteorológicas distribuidas por todo el planeta, incluyendo las ubicadas en buques y boyas en la superficie oceánica. Existen registros meteorológicos más o menos representativos desde finales del siglo xx, pero falta mucha información, y conforme vamos atrás en el tiempo más aún. Para las estimaciones de los últimos siglos se pueden usar los anillos de los árboles, los corales o recurrir a los relatos históricos. Para las estimaciones de los últimos cientos de miles de años se analizan muestras de hielo polar. Todos estos datos no dan una información directa, sino que tienen que ser interpretados. Existen varias organizaciones que se dedican a ello, así que existen varios conjuntos de datos que difieren en el detalle pero coinciden en líneas generales.

Quantificando el impacto humano

No resulta nada sencillo determinar con exactitud qué parte del calentamiento global corresponde a la actividad humana. Por un lado, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se ha disparado en las últimas décadas, casi con absoluta certeza debido al uso humano de los combustibles fósiles como petróleo o gas. Por otro lado, se han detectado patrones de coincidencia entre la actividad solar y las oscilaciones térmicas a corto plazo. Parece ser que la moderación del aumento de las temperaturas en lo que llevamos de siglo xxi habría resultado en una disminución sin el efecto del calentamiento provocado por la actividad humana.



Esquema aproximado de la distribución de las temperaturas medias anuales del aire en la superficie terrestre (°C). La variabilidad alcanza más de ochenta grados centígrados y las anomalías que se intentan detectar son del orden de décimas de grado.

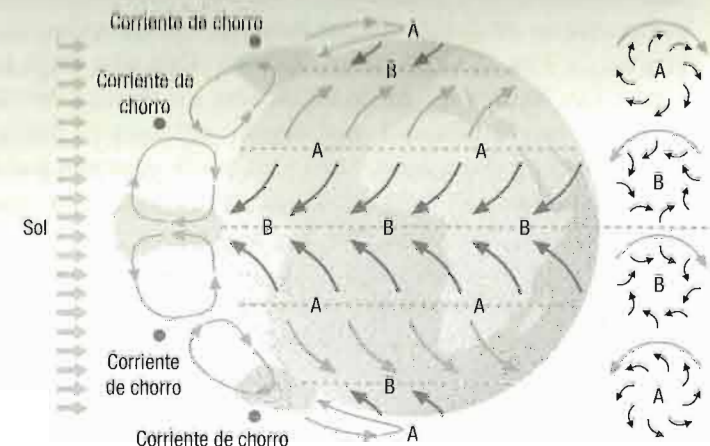


La gráfica muestra la variación de la anomalía térmica y de la radiación recibida del Sol en los últimos tres siglos. Los bajos niveles de radiación habrían sido el motivo de las bajas temperaturas que tuvieron lugar a principios de los siglos xviii y xix.

complejo e implica un equilibrio entre la temperatura, la densidad y el grosor de la atmósfera, que da distintos valores de presión atmosférica, la cual oscila alrededor de los 105000 Pa en el nivel del mar. El aire circula desde las zonas de mayor a menor presión, provocando corrientes superficiales y formando células de circulación que, a nivel global, se estructuran en bandas paralelas desde el ecuador hasta los polos, como se aprecia en la figura 4. En cada hemisferio existen tres bandas más o menos delimitadas por zonas de bajas o altas presiones, donde las masas de aire ascienden o descienden, respectivamente. Las dos franjas de bajas presiones y aire ascendente donde convergen los vientos superficiales se conocen como «frente tropical» y «frente polar». Estos frentes están situados respectivamente en el ecuador y a unos 60° de latitud, aunque están sujetos a variaciones estacionales y a adaptaciones a la morfología terrestre. En las franjas donde oscilan estos frentes es donde se concentran las máximas precipitaciones anuales. Esto es debido a que el aire ascendente contiene una alta concentración de vapor de agua debido a la evaporación de los océanos. La cantidad máxima de vapor de agua que puede contener el aire se llama *humedad de saturación* y varía con la temperatura. A 0 °C en el nivel del mar es de 4 g por metro cúbico de aire, pero puede llegar a los 40 g/m³ en las zonas tropicales. Cuando el aire de la superficie asciende, su temperatura baja, así como su capacidad para retener en suspensión todo su vapor de agua. Entonces el exceso se condensa en forma de gotas líquidas que acaban precipitando. Antes de precipitar, las gotas se acumulan en forma de nubes, pudiendo generar tormentas acompañadas de rayos. Por otro lado, en las franjas de altas presiones casi no se dan precipitaciones. Mientras que la franja subtropical se sitúa a unos 30° de latitud, la polar es más bien una zona cerrada sobre los polos. En la parte superior de las células de circulación se dan corrientes casi horizontales de aire que reciben el nombre de *corrientes de chorro*, o *jet stream* en inglés. Se suelen mantener sobre el frente polar y la franja de altas presiones subtropicales, siendo la primera más intensa que la segunda.

Las células de circulación convectiva global determinan también la dirección de los vientos dominantes en la superficie te-

FIG. 4



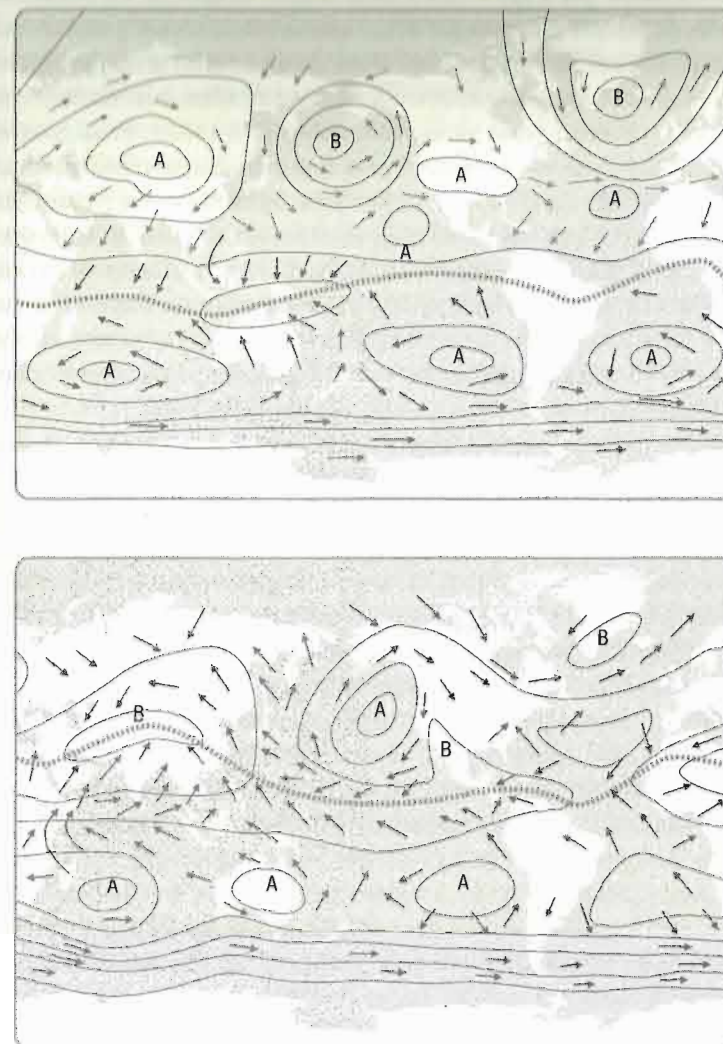
Esquema de las células de circulación de aire por convección y de los vientos dominantes en la superficie, que tienden a ir desde las zonas de altas (A) hacia las zonas de bajas (B) presiones. En el hemisferio norte los vientos tienden a girar en sentido horario por el efecto Coriolis, lo cual provoca que aborden las zonas de baja presión por la derecha y se genera alrededor de estas últimas una circulación en sentido antihorario. En el hemisferio sur sucede lo mismo de forma simétrica. Aprovechando las discontinuidades de las células convectivas, se generan fuertes corrientes de aire que circulan a gran velocidad cerca de la tropopausa: son las corrientes de chorro.

restre (figura 4). Existen tres franjas principales de vientos superficiales dominantes que presentan distintas direcciones debido al efecto Coriolis. Los que van desde la zona de altas presiones subtropical hacia el frente tropical, conocidos como alisios, tienen una componente hacia el oeste. Los que van desde la zona de altas presiones subtropical hacia el frente polar cambian y tienen una componente hacia el este. Finalmente, los que van desde los polos al frente polar vuelven a tener una componente hacia el oeste. Estas tendencias generales se pueden ver alteradas por particularidades de la morfología terrestre. Las franjas no son homogéneas sino que existen puntos donde la presión es mínima o máxima. Los puntos de baja presión son los llamados *ciclones*, y a su alrededor se concentran fuertes vientos superficiales y precipitaciones. Los puntos de alta presión son los llama-

mados anticiclones y se caracterizan por la ausencia de vientos superficiales y precipitaciones. Ciclones y anticiclones tienden a concentrarse en determinadas zonas que varían estacionalmente (figura 5). Por ejemplo, sobre Asia se sitúa una zona anticiclónica en invierno y ciclónica en verano; los vientos estivales, conocidos como monzones, son muy abundantes en lluvia, ya que llegan desde los océanos. Otro caso particular son los ciclones tropicales, llamados también huracanes o tifones, los cuales son especialmente violentos, con fuertes vientos y lluvias intensas. Se forman en las regiones tropicales y se desplazan hacia el oeste, ganando en intensidad mientras se encuentran sobre el océano, y perdiéndola cuando llegan al continente. Su estructura consiste en un ojo central rodeado de grandes sistemas nubosos en espiral.

El conjunto de presiones atmosféricas, precipitaciones, humedad, viento y temperatura es lo que se conoce como clima y, como hemos visto, viene muy marcado por las células de circulación convectiva global. La temperatura depende principalmente de la radiación solar recibida, la cual varía en función de la latitud. Las zonas cercanas al ecuador reciben más radiación que las cercanas a los polos, ya que en las primeras la radiación incide de forma perpendicular a la superficie mientras que en las segundas lo hace de forma tangencial. Es por ello que el clima tiende a ser más cálido en las zonas más cercanas al ecuador y más frío a medida que se acerca a los polos. Teniendo en cuenta también los demás factores se pueden definir distintos tipos de climas. En las latitudes tropicales y subtropicales podemos encontrar los climas cálidos. Tienen temperaturas medias anuales en torno a los 20 °C y se pueden clasificar en: ecuatorial, tropical y desértico. El clima ecuatorial apenas tiene variaciones estacionales, caracterizándose por altas temperaturas y precipitaciones abundantes. El clima tropical se caracteriza por una cierta variación estacional y la concentración de las lluvias durante el verano. El clima desértico, coincidiendo con las altas presiones subtropicales, se caracteriza por la escasa precipitación y la amplia variabilidad térmica. En las latitudes intermedias, en cambio, reinan los climas templados, cuyo régimen de precipitaciones variable es

FIG. 5



Arriba y abajo, respectivamente, se muestra la distribución más frecuente de las zonas de alta (A) y baja (B) presión en el invierno y verano del hemisferio norte. La línea punteada representa la zona de convergencia intertropical (ZCIT), donde convergen los alisios de ambos hemisferios.

menor que el tropical y presenta características climatológicas diferenciadas para las cuatro estaciones. Según la localización exacta podemos diferenciar entre clima continental y oceánico. En este último la variabilidad térmica es menor y la precipitación mayor. También existen climas templados con características específicas, como el mediterráneo y el chino. Finalmente, en las zonas polares, el clima destaca por las bajas temperaturas que nunca superan los 0 °C y por una humedad prácticamente inexistente, ya que casi toda el agua atmosférica precipita en forma de nieve. Por otro lado, la altura influye también en el clima, haciendo disminuir drásticamente la temperatura. Así encontramos también el clima de alta montaña, frío y con precipitaciones localizadas según los vientos dominantes. Los climas pueden sufrir variaciones periódicas, debidas, por ejemplo, a una variación en las temperaturas oceánicas que modifica el régimen de temperaturas y precipitaciones. Esto sucede cíclicamente en América del Sur a causa de los fenómenos conocidos como el Niño y la Niña, los cuales se generan, respectivamente, a causa del calentamiento y enfriamiento de la parte ecuatorial situada al este del océano Pacífico.

Sobre la troposfera podemos encontrar la atmósfera superior, que se puede subdividir en varias capas. La capa más interior se denomina *estratosfera*, cuya temperatura, al contrario de lo que sucede en la troposfera, aumenta con la altitud. En esta capa se encuentra la capa de ozono que absorbe la radiación solar ultravioleta y permite la vida fuera del agua. La siguiente capa es la *mesosfera* y en ella la temperatura vuelve a disminuir con la altitud, antes de volver a aumentar con más intensidad en la *termosfera*. Este efecto es debido a la absorción de las altas frecuencias de radiación solar por parte de ciertas moléculas que se ionizan en la capa conocida como *ionosfera*. La capa más exterior o *exosfera* se atenúa hasta desvanecerse para dar paso al espacio exterior, que empieza a los 100 km de altitud. Aunque algunas moléculas atmosféricas se pierden en el espacio, especialmente las de hidrógeno, que son las más ligeras, la mayor parte, afortunadamente, acaba formando moléculas de agua antes de tener la ocasión de escapar.

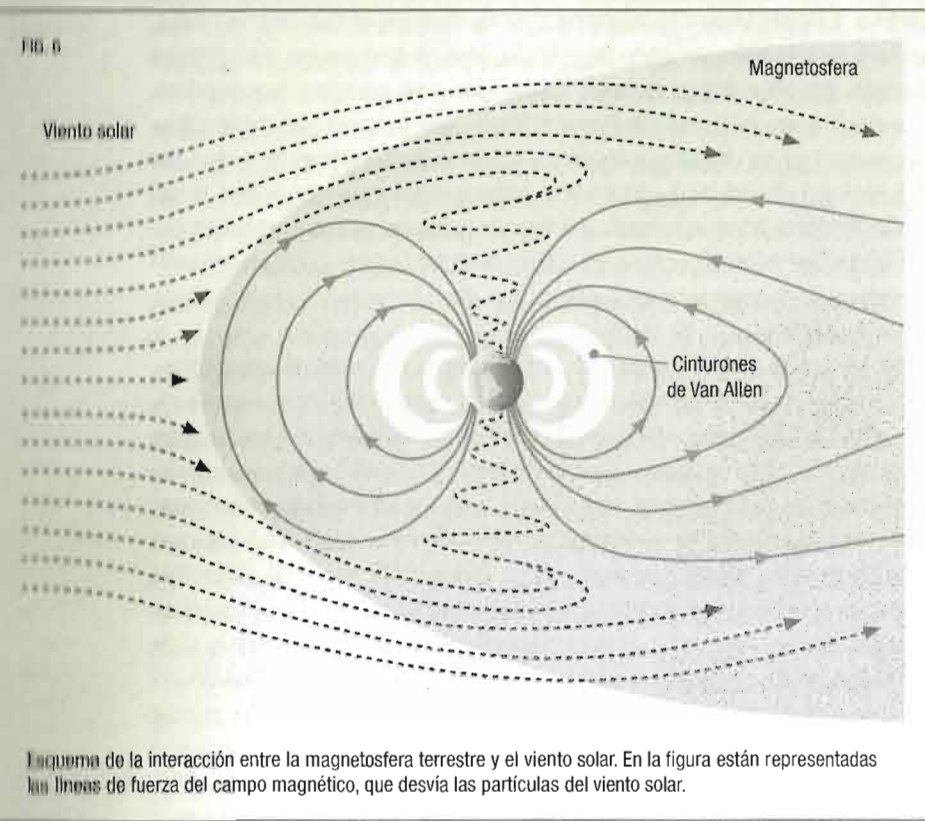
LA MAGNETOSFERA: NUESTRO ESCUDO PROTECTOR

Las propiedades magnéticas del hierro se conocen desde las antiguas civilizaciones y las primeras brújulas datan por lo menos del siglo IX. La idea de que la Tierra es algo así como un gran imán se puede encontrar ya en el libro *De Magnete*, del filósofo y médico inglés William Gilbert (1544-1603), pionero en el estudio del magnetismo, publicado a finales del siglo XVI. Se ha avanzado mucho desde aquella época, en que ni siquiera se sabía qué relación existía entre el magnetismo y la electricidad. Hoy en día sabemos que el magnetismo es un fenómeno que tiene que ver con las corrientes eléctricas que, en el caso de la Tierra, estarían situadas en el núcleo, compuesto principalmente por hierro. Concretamente, parece que se dan en el núcleo externo, donde la presión es menor y todo indica que tiene naturaleza líquida. No se conoce exactamente cómo se generan las corrientes eléctricas, pero se cree que tienen que ver con las corrientes de convección. Existe además alguna relación con la rotación diferencial de núcleo exterior e interior, ya que los polos magnéticos coinciden aproximadamente con los polos geográficos. En todo caso, la dinámica de estas corrientes no está exenta de cierto caos, lo que provoca pequeños desplazamientos de los polos magnéticos.

Si bien los polos magnéticos terrestres coinciden aproximadamente con los geográficos, ya hemos comentado que la polaridad del campo magnético se ha visto invertida varias veces a lo largo de la historia de la Tierra. Estas inversiones han quedado registradas en el magma expulsado por las dorsales oceánicas, concretamente en la orientación de los minerales féreos que se alinean con el campo antes de solidificar. Como las dorsales generan permanentemente nueva corteza mientras las placas tectónicas se separan, el magma solidificado más cercano a la dorsal es más reciente y el más lejano, más antiguo. Las inversiones de polaridad han quedado registradas, pues, en forma de distintas bandas con sentidos de orientación magnética alternos a cada uno de los lados de las dorsales. La última de estas inversiones ocurrió hace unos ochocientos mil años, pero los perio-

dos sin inversión pueden tener unas duraciones muy variables, desde menos de diez mil hasta decenas de millones de años.

La magnetosfera es la región de influencia del campo magnético terrestre, cuyo límite es moldeado por la acción del viento solar (figura 6). En dirección al Sol, la onda de choque está a una distancia de unas trece veces el radio de la Tierra. En dirección contraria, su cola se extiende mucho más allá. La magnetosfera protege al planeta del viento solar, que solamente puede penetrar por los polos magnéticos. Al llegar el viento solar a la magnetosfera, las partículas que lo componen son desviadas hacia los lados. La mayoría de ellas siguen su camino tras ser desviadas, pero algunas quedan atrapadas formando los denominados



Arriba, una simulación muestra la capa magnética que envuelve la Tierra, la magnetosfera. El flujo procedente del Sol forma las características ondas de Kelvin-Helmholtz. Abajo, una aurora boreal captada en Alaska.

cinturones de Van Allen alrededor del planeta. Las que tienen menor velocidad son conducidas por las líneas de fuerza a los polos magnéticos generando las espectaculares auroras boreales en el hemisferio norte y las auroras australes en el hemisferio sur. Los episodios especialmente violentos de viento solar tras una erupción se conocen como tormentas solares. Las más potentes son capaces de provocar caídas del suministro eléctrico, interferencias en las telecomunicaciones o desactivar satélites. Una de las más importantes tuvo lugar en 1859 e inutilizó gran parte de las líneas telegráficas de Estados Unidos y Europa. Fue tan intensa que se llegaron a ver auroras boreales incluso en el Caribe y Hawái.

La vida

Se estima que el ser humano es solamente una de los millones de especies de seres vivos que habitan la Tierra. Aunque tan solo supone un pequeño porcentaje de la biomasa total de nuestro planeta, tiene el poder suficiente para alterar sus características. Aunque no es la única especie que ejerce este poder.

La característica más destacable de la Tierra es que, a día de hoy, es el único cuerpo celeste en el que sabemos que se ha desarrollado la vida. Esto ha sido posible gracias a las características de nuestro planeta, como su distancia al Sol, una atmósfera que conserva el calor y la presencia de grandes cantidades de agua líquida en superficie. Este último hecho es fundamental para la vida tal y como la conocemos, ya que todos los organismos celulares están compuestos básicamente de agua. Ello se debe a que es un buen disolvente que facilita las complejas reacciones químicas que posibilitan la vida. Si la vida es tan solo un cúmulo de reacciones químicas, ¿qué es lo que la diferencia del resto de reacciones no biológicas? Esto nos lleva a la eterna cuestión inevitable: ¿qué es la vida? Vaya por delante que no existe una respuesta sencilla a esta pregunta. En cualquier caso, es una característica que poseen ciertas entidades físicas que implica autorreparación y adaptación a los cambios en el medio. A tales efectos, usa estrategias como la reproducción, la obtención y administración de energía y la respuesta a estímulos externos o de protección.

La vida lleva desarrollándose en nuestro planeta desde prácticamente sus orígenes, hace 4 600 millones de años. Se estima que

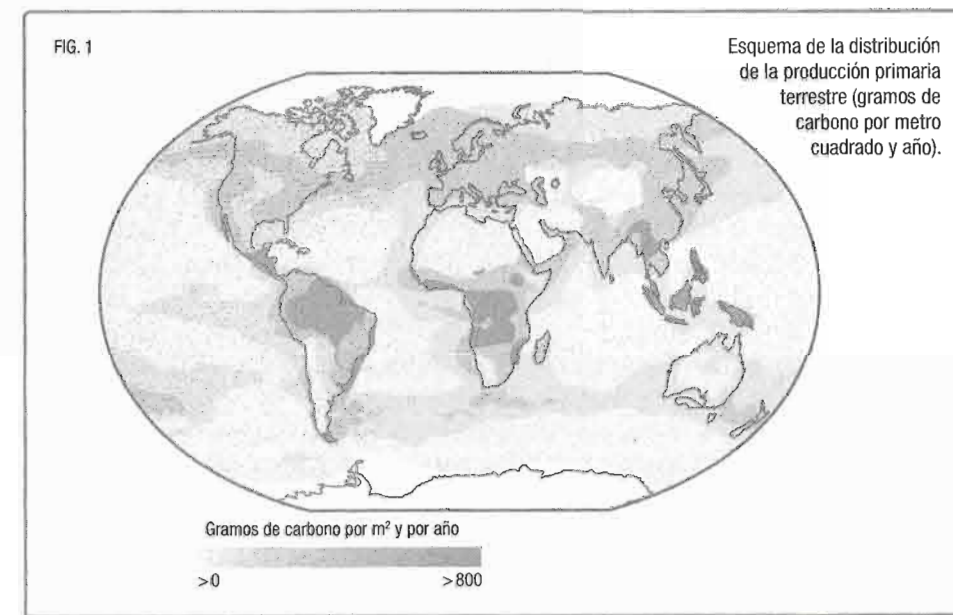
las primeras moléculas autorreplicantes aparecieron unos pocos centenares de millones de años más tarde. Las sucedieron los organismos unicelulares, algunos de los cuales desarrollaron la fotosíntesis para almacenar y reusar la energía solar. Las versiones más evolucionadas dieron lugar a la acumulación de oxígeno en la atmósfera y la posterior formación de la capa de ozono, que filtra la radiación ultravioleta. Estos acontecimientos posibilitaron la evolución de organismos pluricelulares cada vez más complejos. Hace aproximadamente 540 millones de años tuvo lugar una expansión y diversificación de seres pluricelulares que han dejado su impronta en un amplio registro de fósiles. Es lo que se conoce como la *explosión cámbrica*. Después de esta, acaecieron varias extinciones masivas, tras las cuales la vida se ha abierto camino diversificándose cada vez más. La última tuvo lugar hace 65 millones de años, probablemente provocada por el impacto de un meteorito. Sea como fuere, en ella se extinguieron los dinosaurios, lo que favoreció la evolución de los pequeños mamíferos, a partir de los que se desarrolló nuestra especie, el *Homo sapiens*.

Nuestra especie habita la Tierra desde hace algo más de doscientos mil años, y en ese tiempo se ha dispersado por todo el planeta. Durante el siglo pasado la población humana sufrió un crecimiento exponencial que llegó a sus máximos durante sus últimas décadas. Además, la actividad humana se ha amplificado también de forma espectacular, afectando a una multitud de otras especies. Por ejemplo, en el ámbito terrestre, ha reducido la biomasa de mamíferos salvajes drásticamente, causando la extinción de un gran número de especies y poniendo en peligro a muchas otras. Sin embargo, el ser humano sigue representando en términos absolutos tan solo un pequeño porcentaje de la biomasa total de la Tierra y necesita del resto para su supervivencia, ya que no es autosuficiente desde el punto de vista biológico.

LA BIOSFERA: AMALGAMA DE VIDA

La vida en la Tierra se extiende por parte del subsuelo, la superficie, la hidrosfera y la atmósfera. La zona en la cual se desarrolla

recibe el nombre de biosfera y constituye una capa cuyos límites se extienden desde los fondos oceánicos hasta los 10 km de altitud en la atmósfera. La vida se distribuye por la biosfera de forma irregular, y para medir la riqueza biológica que alberga se usan distintos parámetros, como la biomasa, la biodiversidad y la producción primaria (figura 1). Mientras que la biomasa es la cantidad de masa que constituyen todos los organismos vivos, la biodiversidad es el número de especies existentes. La cantidad de materia que es transformada en compuestos orgánicos por los organismos autótrofos, aquellos que generan su energía a partir de compuestos inorgánicos, constituye el proceso de producción primaria. Estos organismos se sitúan en la base de la cadena trófica, por donde circula la energía acumulada en forma de nutrientes. La producción primaria tiene lugar básicamente a través de uno de estos dos procesos: la fotosíntesis, en la que se aprovecha la energía de la radiación solar, o la quimiosíntesis, en la que se emplea la energía química acumulada en ciertos compuestos inorgánicos. La primera es la más común y tiene lugar



allí donde llega la radiación solar, referida habitualmente como luz. La segunda es más limitada, ya que depende de la existencia de potenciales químicos importantes en mezclas inestables de sustancias generadas localmente por procesos geológicos.

En los continentes, los principales productores primarios son las plantas terrestres capaces de realizar la fotosíntesis. Estas plantas transforman los nutrientes inorgánicos en orgánicos, valiéndose de la energía aportada por la radiación solar. Básicamente toman dióxido de carbono de la atmósfera y agua del subsuelo para transformarlos en compuestos orgánicos donde se almacena energía química y en oxígeno que liberan de vuelta a la atmósfera. La disponibilidad de agua en el subsuelo y la energía solar son, pues, los principales factores que determinan la distribución de la producción primaria terrestre y, consecuentemente, la riqueza biológica. Según las precipitaciones, fuertemente marcadas por la circulación atmosférica global, podemos distinguir varias bandas latitudinales en nuestro planeta. La máxima riqueza biológica se concentra en la banda ecuatorial, con lluvia abundante y radiación solar perpendicular, mientras que la mínima se encuentra en las regiones polares, con agua líquida escasa y radiación solar tangencial. Entre el ecuador y los polos no existe una transición gradual de riqueza biológica, ya que existen bandas con escasez y abundancia de precipitaciones. Las dos bandas simétricas contiguas a la banda ecuatorial son desérticas o semidesérticas, y en ellas la densidad de biomasa es baja, aunque cuenta con una elevada biodiversidad. Las dos bandas simétricas contiguas a las zonas polares tienen abundancia de lluvias y radiación solar suficiente, y la densidad de biomasa, así como la biodiversidad, son elevadas. Existen también otros factores menores que matizan la riqueza biológica en estas bandas, como la orografía y la distancia a los océanos.

En los océanos, la producción primaria tiene mucha menos densidad que en los continentes, correspondiéndoles solo la mitad de la producción total, a pesar de ser mucho más extensos. Al igual que en los continentes, los organismos autótrofos obtienen básicamente su energía por fotosíntesis, concentrándose en la parte superior hasta donde penetra la luz solar, en lo que se

conoce como *zona fótica*. La profundidad de esta zona es muy variable, pudiendo llegar desde pocos decímetros hasta cientos de metros, dependiendo del ángulo de incidencia de la radiación solar y de la turbidez de las aguas. En las regiones tropicales, el límite de la zona fótica acostumbra a estar situado a unos doscientos metros de profundidad donde hay aguas transparentes. Curiosamente, la gran radiación recibida tiene un efecto negativo sobre la producción primaria, ya que el calentamiento del agua acentúa la estratificación y la pérdida hacia capas inferiores de los nutrientes necesarios para los seres autótrofos. Así pues, en las regiones tropicales alejadas de los continentes hay una gran pobreza biológica. Sin embargo, en las regiones cercanas a los continentes, donde las corrientes hacen aflorar nutrientes desde el fondo, se desarrollan los ecosistemas marinos más ricos y complejos, como es el caso de los arrecifes coralinos. Por otro lado, en las regiones más frías existe una importante densidad de producción primaria más uniformemente repartida, debido a la mayor disponibilidad de nutrientes.

Si bien la radiación solar es muy importante, no toda la vida tiene que estar directamente a su alcance, ya que la energía se redistribuye al resto de seres no autótrofos a través de la cadena trófica. Por ejemplo, en los profundos fondos oceánicos donde no llega la luz, la vida se nutre de la materia orgánica que cae desde las capas superiores. Además, existen también seres autótrofos que no necesitan la radiación solar, pudiendo obtener su energía a través de la quimiosíntesis. Este tipo de organismos se desarrollan, por ejemplo, en ciertos lugares con aguas calientes cargadas de sales, como los cercanos a las zonas volcánicas. Recientemente se ha comprobado que pueden encontrarse también en niveles profundos de la corteza. De hecho, la diversidad de especies que habitan la Tierra es enorme, y algunos microorganismos son capaces de sobrevivir en condiciones extremas, tanto de frío cercano al cero absoluto, como de calor próximo a la temperatura de ebullición del agua e incluso, como se ha comprobado en determinados experimentos, en el espacio exterior. En todo caso, como veremos a continuación, todas estas especies comparten una serie de características que indican un origen común.

LA EVOLUCIÓN: ESE LARGO Y TORTUOSO CAMINO

Se calcula que actualmente hay entre unos cinco y cincuenta millones de especies de seres vivos sobre la Tierra. Se trata de una simple estimación, ya que el número de especies realmente documentado es de aproximadamente dos millones. Estas inclu-

La evolución me parecía mucho más emocionante que el relato bíblico. ¿Quién no preferiría antes ser un mono ascendente que un ángel caído?

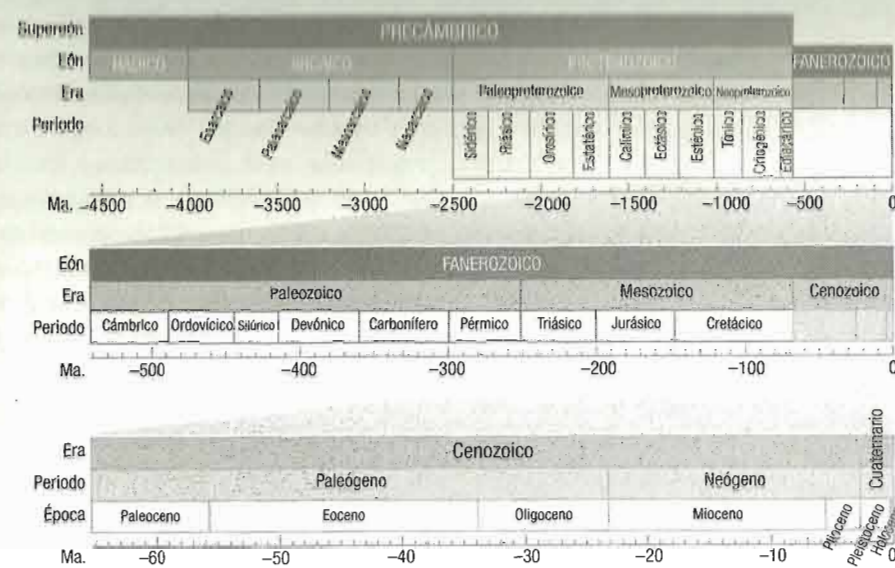
TERRY PRATCHETT, ESCRITOR DE CIENCIA FICCIÓN

yen desde las más sencillas bacterias hasta el ser humano. A pesar de sus diferencias, todas ellas comparten una gran cantidad de complejos mecanismos bioquímicos, por lo que se cree que han evolucionado a partir de un único antepasado común. Existen varias hipótesis sobre los orígenes de la vida, algunas de las cuales los sitúan unos pocos cientos de millones de años después de la formación de nuestro planeta. La escasez de registros rocosos de aquel tiempo hace que sea una cuestión difícil de determinar. La ventana de posibilidades va desde mediados del eón hádico hasta mediados del eón arcaico. Los eones (figura 2) son las divisiones temporales más básicas en la historia de la Tierra. Son un total de cuatro, completados por los eones proterozoico y fanerozoico. Los tres primeros forman el supereón precámbrico que finalizó hace unos 540 millones de años, precediendo al cámbrico, el primero de los periodos del fanerozoico (que significa «vida visible» en griego), en cuyos estratos aparecen los primeros fósiles macroscópicos.

Los orígenes de la vida

La formación de la Tierra ocurrió durante el eón hádico, el cual se inició hace unos 4600 millones de años y se prolongó hasta unos 4000 millones de años atrás, un tiempo en el que también el sistema solar sufría importantes cambios. Este eón finalizó con un periodo conocido como «bombardeo intenso tardío», en el que tuvo lugar una frecuencia relativamente alta de impacto de

FIG. 2



Esquema de la escala de tiempo geológico desde la formación de la Tierra, siendo los eones la división principal. El eón actual es el Fanerozoico, dividido en varias eras. La era actual es el Cenozoico, dividida a su vez en periodos. El periodo actual, el Cuaternario, consta de dos épocas, la más reciente de las cuales se denomina Holoceno y coincide con la última época glacial.

meteoritos, a través de los cuales se cree que llegó gran parte del agua a la Tierra. Resulta que las primeras evidencias de roca sedimentaria oceánica son posteriores y se cree que, ya durante el eón hádico, empezó a aparecer una primitiva corteza alrededor de nuestro planeta, que entonces era una gran esfera incandescente. Se estima que en aquel tiempo contaba con unas placas tectónicas muy fragmentadas y activas, además de un intenso vulcanismo, todo ello consecuencia de la ordenación inicial de los materiales por densidad. Es muy posible que este ambiente tan hostil, acompañado del bombardeo de asteroides, provocara episodios de devastación, entre los cuales habría podido ya aparecer la vida. La corteza siguió desarrollándose durante el eón arcaico, que finalizó unos 2500 millones de años atrás, tien-

po durante el cual la actividad geológica fue mucho más activa que posteriormente. Las rocas más antiguas conocidas datan de aproximadamente 4400 millones de años atrás.

Las bacterias son los primeros organismos de los que se dispone de una evidencia fósil, aunque aún está en discusión cuáles son las más antiguas. Durante mucho tiempo se ha creído que los fósiles de bacterias más antiguos eran unos que se habían encontrado en rocas sedimentarias de 3400 millones de años de edad en Australia. Sin embargo, hay que ser cautelosos, ya que algunos estudios recientes señalan que estos podrían ser simplemente formaciones minerales. La cuestión de la antigüedad de los primeros fósiles está aún abierta, así que todas las hipótesis sobre la evolución previa simplemente se mueven en el campo de la especulación. Parece que se han encontrado isótopos de carbono de origen biológico en rocas de hace unos 3700 millones de años en Groenlandia. También existen estudios geoquímicos que sitúan la aparición de la vida incluso antes del bombardeo intenso tardío.

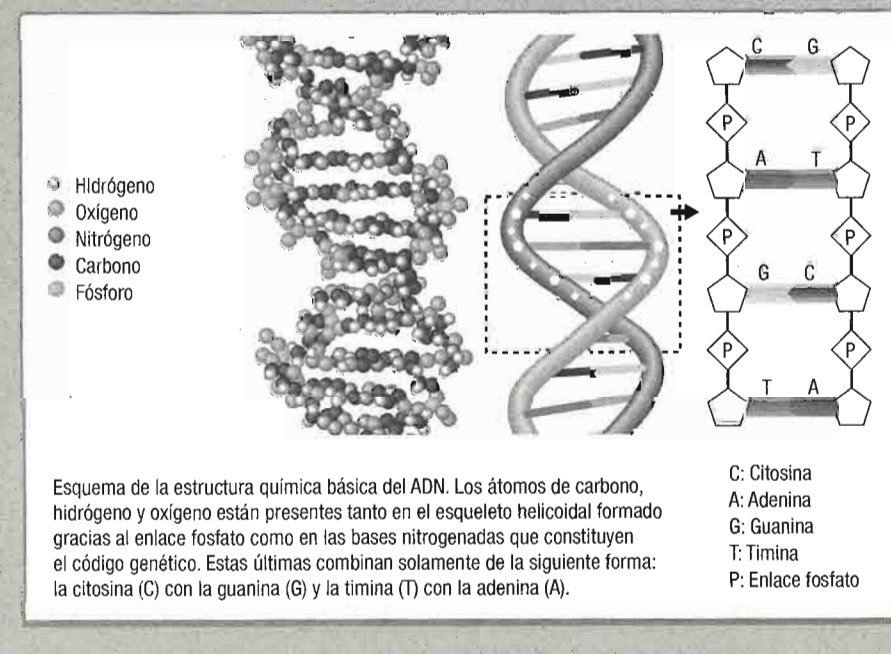
Las teorías que intentan explicar el origen de la vida se apoyan en las características básicas que comparten todos los seres vivos, como la estructura del código genético a partir de ácidos nucleicos (ADN y ARN) y la estructura celular. Hay quien dice que los primeros organismos vivos pudieron llegar a la Tierra desde el espacio, en cuyo caso su procedencia más verosímil sería Marte, aunque existen también otras hipótesis sobre procedencia exterior al sistema solar. La teoría según la cual la vida se originó en la propia Tierra se llama «abiogénesis» y se centra en tres propiedades: autorreplicación, metabolismo y membranas celulares. Las dos primeras son, respectivamente, la capacidad de los organismos para reproducir copias muy similares a sí mismo y la capacidad para obtener energía a partir de los nutrientes. Por su parte, las membranas celulares impiden la entrada de sustancias no deseadas. Existen diversas hipótesis sobre cómo adquirieron los organismos vivos estas propiedades, siendo las más aceptadas las del mundo de ARN (ácido ribonucleico) y de hierro-azufre. La primera propone que el ARN fue la primera forma de vida en la Tierra, y que desarrolló posteriormente una

LA QUÍMICA DE LA VIDA

La química de la vida en la Tierra se conoce como «química orgánica» y está basada en el carbono, que proporciona una estructura estable para las sustancias complejas. En esta disposición tiene una importancia fundamental la forma en que está organizado el átomo de carbono. Este necesita cuatro electrones para alcanzar una estructura atómica estable, así que tiende a formar enlaces con otros átomos, ya sean de carbono o de otros elementos. Los enlaces entre átomos de carbono se forman fácilmente, dando lugar a largas cadenas lineales, ramificadas y cerradas. Estas moléculas se pueden clasificar según sus propiedades y funciones. Por ejemplo, los glúcidos proporcionan energía instantánea y los lípidos la almacenan. Existen también moléculas con propiedades más diversas, como las proteínas, cuyas funciones pueden ser desde estructurales hasta reguladoras de las reacciones bioquímicas. Su especificidad proviene de sus estructuras tridimensionales únicas, y la información para generarlas se guarda en los ácidos nucleicos, que resultan claves para la autorreplicación.

Cadenas de macromoléculas: los ácidos nucleicos (ARN y ADN)

El ácido ribonucleico (ARN) participa en la síntesis de las proteínas y realiza la función de mensajero de la información que se almacena en el ácido desoxirribonucleico (ADN). Este último se encuentra en el interior de las células y constituye lo que se denomina código genético, el cual permite transmitir la información de cada generación a la siguiente.



membrana celular a su alrededor dando lugar así a la primera célula. La segunda hipótesis propone que una modalidad primitiva de metabolismo basada en el hierro-azufre precedió al ARN. Esta modalidad se habría desarrollado cerca de fuentes hidrotermales en un ambiente con altas presiones y temperaturas de unos 100 °C. Las primeras células habrían aparecido antes del ARN, en forma de burbujas en las superficies de minerales.

Si bien parece que la vida apareció en la Tierra relativamente pronto, durante miles de millones de años estuvo formada solo por organismos unicelulares. La evolución que sufrieron estos organismos y las modificaciones que provocaron en nuestro planeta fueron transcendentales para el posterior desarrollo de organismos más complejos. Ya en el eón arcaico, algunos organismos realizaban la fotosíntesis, que inicialmente era anoxigénica, es decir, que no desprendía oxígeno. Probablemente a finales del arcaico aparecieron los primeros organismos (como las cianobacterias) capaces de realizar la fotosíntesis oxigénica, empezando a desprender oxígeno. Este se fue acumulando en la atmósfera hasta bien entrado el eón proterozoico, llegando a concentraciones comparables a la actual. También fue durante el proterozoico cuando se consolidaron las grandes masas de tierra que dieron lugar a las plataformas continentales y tuvieron lugar las primeras glaciaciones conocidas. Paralelamente, tuvo lugar uno de los pasos evolutivos más importantes del precámbrico: la aparición de células con núcleo, las eucariotas. El fósil conocido más antiguo de células eucariotas es de hace 1700 millones de años, aunque se cree que su aparición se puede remontar hasta hace 3000 millones de años. Las células con núcleo posibilitaron una mayor complejidad y, en última instancia, la aparición de organismos pluricelulares. Los primeros organismos pluricelulares tenían cuerpo blando y se sabe que existían ya antes del periodo Cámbrico.

La explosión cámbrica: el estallido de la biodiversidad

El Cámbrico es el primer periodo del eón Fanerozoico que abarca desde hace unos 540 millones de años atrás hasta la actualidad.

El registro fósil del Cámbrico presenta una repentina aparición de muchas especies de organismos pluricelulares. En términos geológicos, «repentina» puede significar varias decenas de millones de años, lo cual permite una explicación evolutiva del fenómeno, no exenta de ciertas dificultades, para dar cuenta de la amplia diversidad y complejidad de los organismos. Puede que, simplemente, se tratara de un incremento de la capacidad de producir colágeno, lo que permitió a los organismos dotarse de esqueleto y conchas, constituyendo fósiles más duraderos que sus blandos predecesores. Quizá la estructura genética básica llegó a un punto de evolución en que permitía múltiples posibilidades con pequeñas variaciones. Se han sugerido también factores ambientales como glaciaciones, un aumento del oxígeno atmosférico o la fragmentación de un gran continente. En todo caso, el periodo Cámbrico supuso una gran diversificación de organismos macroscópicos multicelulares que han ido ganando en complejidad hasta la actualidad.

Actualmente los seres vivos se clasifican según una estructura jerarquizada de grupos o taxones que, de mayor a menor, han recibido tradicionalmente los siguientes nombres: dominio, reino, división o filo, clase, orden, familia, género y especie. Las distintas clasificaciones intentan seguir un criterio evolutivo y también que las especies con un mismo antepasado común estén agrupadas en el mismo taxón. Los virus son organismos acelulares y no forman parte de estas clasificaciones, pues se considera que son simples segmentos de ácidos nucleicos que se han independizado de determinadas especies. En cuanto a los organismos celulares, se pueden clasificar en dos dominios principales: las células procariotas, sin núcleo, y las eucariotas, dotadas de él. Las procariotas son unicelulares y se pueden clasificar a su vez en dos reinos: arqueas y bacterias. Las eucariotas, por su parte, se pueden clasificar en cuatro reinos: protistas, hongos, plantas y animales. No existe una única clasificación posible ya que, actualmente, los estudios del código genético están desvelando nuevas relaciones evolutivas. De hecho, las clasificaciones más recientes evitan otorgar categorías a los taxones para permitir una mayor flexibilidad en las actualizaciones. En algunas

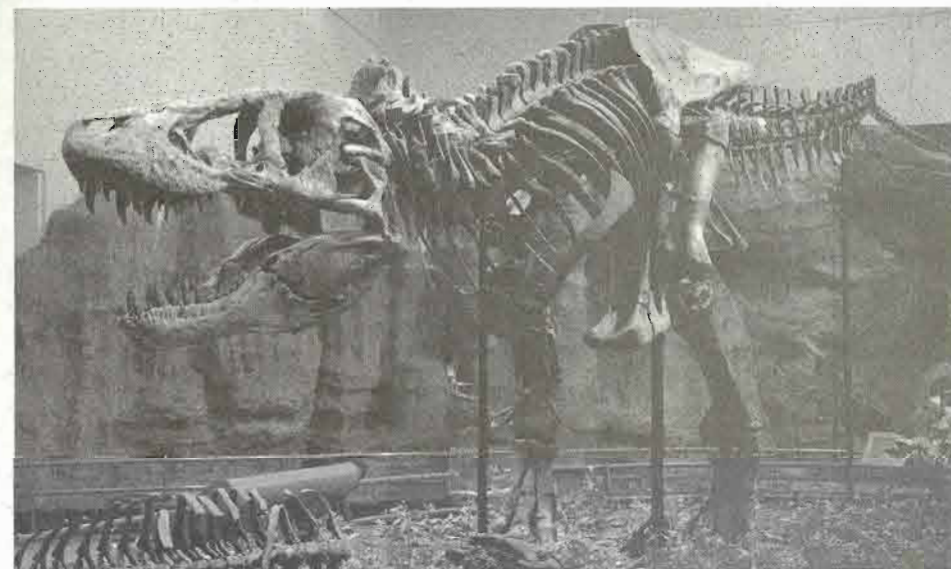
clasificaciones, las arqueas y bacterias forman dominios independientes, y las primeras tienen una relación más estrecha con las eucariotas que las segundas. Se ha propuesto también que los protistas, definidos como aquellos seres que no encajan en

ninguno de los otros tres reinos eucariotas (hongos, plantas y animales), se dividan en dos reinos: protozoos y cromistas. El propio carácter que entraña esta definición sugiere que su estructura va a ser aún objeto de numerosas adaptaciones en el futuro. Por último, hongos y plantas se distinguen entre ellos porque tan

solo las segundas son autótrofas, distinguiéndose ambas de los animales por su carencia de capacidad locomotora.

En cuanto a los animales, a pesar de que existen casi cuarenta filos distintos, la inmensa mayoría pertenecen a alguno de estos: artrópodos, moluscos, cordados, platelmintos, nematodos, anélidos, cnidarios, equinodermos o poríferos. El mayor número de especies con diferencia corresponde a los artrópodos, un tipo de invertebrados con esqueleto externo y apéndices articulados entre los que encontramos insectos, arácnidos, crustáceos o miriápodos. Los siguientes filos con mayor número de especies son los de los moluscos y cordados. Los primeros se caracterizan por tener un cuerpo blando, como los pulpos, ocasionalmente protegido por una concha, como es el caso de los caracoles, mientras que los segundos se caracterizan por la presencia, entre otras cosas, de una cuerda dorsal. La mayoría de cordados pertenecen al subfilo de los vertebrados, de los cuales casi la mitad de especies pertenecen a la clase de los peces. Las otras cuatro clases de vertebrados son: mamíferos, aves, reptiles y anfibios. Todos ellos animales que evolucionaron tras la explosión cámbrica al principio del eón Fanerozoico, dividido en las eras Paleozoica, Mesozoica y Cenozoica.

La primera era, la Paleozoica, consta de seis periodos: Cámbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico, Carbonífero y Pérmico (véase la figura 2). En los tres primeros periodos la vida se desa-



Arriba, imagen del fósil de un *Archaeopteryx*, un género extinto de aves primitivas que vivió durante el Jurásico y que comparte características con los dinosaurios. Abajo, imagen de la reconstrucción del esqueleto de un *Tyrannosaurus rex*, una de las últimas especies de dinosaurios en aparecer, antes de la extinción. Si se usa una nomenclatura puramente evolutiva, se puede clasificar a las aves como dinosaurios, usándose la denominación «dinosaurios no aviares» para el resto.

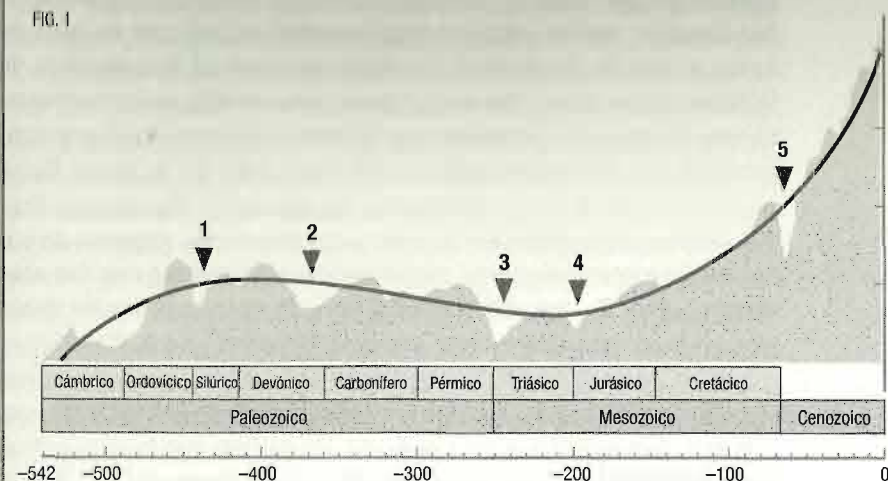
LAS EXTINCIONES MASIVAS

Aunque la de los dinosaurios es la extinción masiva más conocida, no es la única que se puede apreciar en el registro fósil del Fanerozoico. Es tan solo la última de cinco grandes extinciones, en las que se ha detectado un descenso de aproximadamente la mitad de los géneros marinos y se estima que el descenso real se aproximaría a las cuatro quintas partes (figura 1). En el caso de la extinción que marca el límite entre la era Paleozoica y Mesozoica, la disminución detectada y estimada supera, respectivamente, el 80 % y el 95 %. No está claro cuáles son las causas de estas grandes extinciones, y de hecho se barajan varias posibilidades, como ciertos cambios en las condiciones atmosféricas y el nivel del mar, una actividad volcánica extraordinaria o el impacto de asteroides. En cuanto a esto último, se ha calculado que, estadísticamente, cada cien millones de años un asteroide kilométrico impacta contra la Tierra. Estos impactos tienen más posibilidades de ocurrir cuando el sistema solar entra en una zona más densa de la galaxia, aproximadamente cada veinticinco millones de años. Entonces aumenta el riesgo de perturbaciones gravitatorias capaces de modificar la trayectoria y provocar que algunos asteroides lejanos se precipiten hacia el sistema solar interior. También se han apuntado como posibles causas de esas extinciones la exposición a intensos vientos estelares o a la radiación procedente de supernovas cercanas.

La extinción de los dinosaurios

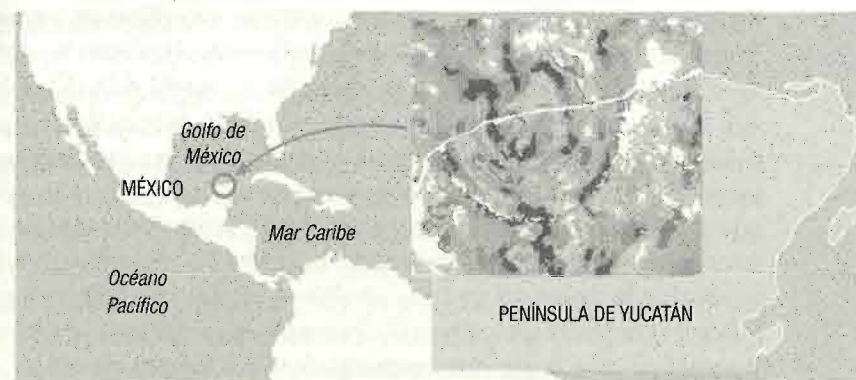
En el registro fósil del Mesozoico consta una gran cantidad de especies de dinosaurios que desaparecen de forma repentina en los estratos con menos de 65 millones de años, punto en el que se sitúa el principio del Cenozoico. La hipótesis que tiene más aceptación para explicar esta desaparición es la extinción tras el impacto de un gran meteorito. Esta hipótesis se apoya en el hecho de que se ha detectado una concentración de iridio inusualmente alta en un estrato cuya datación coincide con la desaparición de los fósiles. Resulta que el iridio es raro en la Tierra, pero se encuentra en ciertos asteroides y se habría esparcido por todo el planeta por desintegración durante el impacto. Además, en la península de Yucatán, en México, se ha detectado el cráter de Chicxulub, cuyas estructuras circulares subterráneas alcanzan unos 100 km de radio y cuya antigüedad coincide con la extinción (figura 2). Esta estructura fue descubierta a finales de la década de 1970 en el transcurso de unas prospecciones petrolíferas. Desde entonces se han llevado a cabo numerosos estudios geológicos que han afianzado la hipótesis de que se trata del resultado del impacto de un gran meteorito cuyo tamaño se estima en unos 10 km. Según cálculos realizados por los expertos, el impacto habría liberado unos $4 \cdot 10^{23}$ julios, una energía millones de veces mayor que la desencadenada por cualquier explosivo jamás creado por el ser humano. Un acontecimiento de tal violencia habría provocado sin duda fenómenos de escala planetaria, tales como tsunamis, incendios, terremotos y erupciones volcánicas globales. Hay diversidad de opiniones sobre el mecanismo exacto por el cual este impacto habría acabado con los dinosaurios, que podría implicar lluvia radiactiva o un cambio climático. De hecho, el impacto es solo la hipótesis más aceptada, pero hay otras que implican procesos más graduales y menos violentos.

FIG. 1



La gráfica muestra la evolución en el número de géneros marinos en el registro fósil desde el Cámbrico. Se pueden ver las cinco grandes extinciones masivas ocurridas durante el Fanerozoico.

FIG. 2



Esquema de las anomalías gravitatorias alrededor del cráter de Chicxulub al noroeste de la península de Yucatán, en México. Estas anomalías indican estructuras circulares concéntricas subterráneas de hasta unos cien kilómetros de radio.

rolló básicamente en los océanos. A finales del Cámbrico y principios del Ordovícico habían aparecido ya los primeros peces. Parece ser que durante el Silúrico el nivel medio de los océanos fue elevado, según indica el amplio registro fósil que ha llegado hasta nosotros. Durante el Devónico se produjo la conquista de la tierra firme. Las primeras plantas con semilla se extendieron formando grandes bosques, proliferaron los artrópodos y aparecieron los primeros anfibios. La conquista de la tierra firme se afianzó en el Carbonífero con la aparición de los reptiles. También se desarrollaron los insectos voladores, algunos de los cuales llegaron a alcanzar casi sesenta centímetros con las alas desplegadas. Fue en este periodo cuando toda la masa de tierra emergida se concentró en el gran continente Pangea. Existieron extensas superficies de bosque que, tras quedar sucesivamente sepultadas, han dado lugar a los característicos estratos de carbón que dan nombre a este periodo. Se estima que la concentración de oxígeno en la atmósfera llegó a alcanzar el 35%. Finalmente, durante el Pérmico hubo importantes cambios climáticos con el retroceso del hielo polar y una tendencia general de los climas tropicales a condiciones más secas y áridas.

Tras el periodo Pérmico, vino la era Mesozoica, que consta de tres periodos: Triásico, Jurásico y Cretácico (figura 2). En el Triásico aparecieron los dinosaurios, que evolucionaron a partir de los reptiles y dominaron la tierra firme hasta su extinción, que marca el final del Cretácico. Sin embargo, esta extinción no acabó por completo con su línea evolutiva, ya que las aves son sus descendientes (véase la imagen superior de la pág. 143). A finales del Triásico aparecieron también los primeros mamíferos, fruto de la evolución de determinados reptiles. La característica distintiva principal de los mamíferos es que consiguieron regular su temperatura corporal, logrando así colonizar regiones geográficas con bajas temperaturas donde las otras especies no podían sobrevivir. Esta capacidad de regulación térmica les permitió también la mejor adaptación al medio nocturno. Entre las mejoras evolutivas que incorporaron los mamíferos destacan los tejidos especializados para la protección, un aparato locomotor perfeccionado para ahorrar energía o la disminución de la super-

ficie corporal. También sus aparatos orgánicos fueron desarrollándose y especializándose durante el Mesozoico.

Por último, está la era Cenozoica, y consta de tres periodos: Paleógeno, Neógeno y Cuaternario (figura 2). Comprende desde la extinción de los dinosaurios hasta la actualidad y se caracteriza por la expansión y diversificación de los mamíferos. Esta diversificación, así como la de las aves, fue especialmente intensa durante los primeros millones de años del Paleógeno, ya que pudieron ocupar los nichos ecológicos más favorables que habían dejado vacíos los dinosaurios. De todas formas, el registro de fósiles es limitado, por lo que es muy difícil rastrear con detalle qué características adquirieron entonces y cuáles tenían ya anteriormente. En cualquier caso, en el Neógeno se hacen ya reconocibles las familias de mamíferos y aves modernos. Es en este periodo cuando aparecen los primeros simios. Finalmente, el Cuaternario es un periodo geológico relacionado con los últimos ciclos de glaciaciones, pero sin duda el fenómeno biológico más destacable que ocurrió durante este periodo es la aparición del ser humano.

LA IMPORTANCIA DE ANDAR ERGUIDO: EL HOMÍNIDO BÍPEDO

Brindaremos al *Homo sapiens*, la especie de la que formamos parte, un trato especial. Nuestros parientes no extintos más cercanos son los grandes simios, es decir, gorilas, chimpancés y orangutanes. Todos ellos comparten con nosotros ancestros homínidos comunes, aunque no está del todo claro a cuándo nos tenemos que remontar para encontrarlos. Una de las primeras características que llevaron a la distinción de nuestra especie fue el bipedismo. Los primeros homínidos de los que se tiene la seguridad de que fueron completamente bípedos son los australopitecos, de los que se han conservado esqueletos relativamente completos, como el de la famosa Lucy, cuyos restos fueron encontrados en 1974 cerca de Adís Abeba, en Etiopía. Varias especies de este género se desarrollaron entre cuatro y dos millones de años atrás en el sudeste africano. Poseían una capacidad

craneal de un tercio del *Homo sapiens* y su estatura oscilaba alrededor de 1,3 m. Parece ser que hace unos 2,8 millones de años tuvo lugar un cambio climático que hizo retroceder las zonas arboladas donde habitaban los australopitecos. Algunas especies evolucionaron adaptando sus pies, alineándose completamente el dedo gordo con los otros.

Esta pequeña mejora les permitió recorrer mayores distancias, así como una mayor posibilidad de adquirir alimentos y de incorporar más proteínas animales, lo que redundó en un aumento de su capacidad craneal, dando lugar al género *Homo*. El *Homo habilis*, que apareció hace unos 2,5 millones de años, sabía fabricar herramientas y conservarlas para un futuro uso. Aunque actualmente se cree que algunos australopitecos habían tenido ya esa capacidad, no se sabe con total seguridad, pues las herramientas de piedra más antiguas encontradas no están asociadas a restos fósiles. El sucesor cronológico del *Homo habilis* fue el *Homo ergaster*, que apareció hace 1,8 millones de años y se extendió por todo el mundo.

Los fósiles más antiguos de *Homo sapiens* anatómicamente equiparables a nosotros datan de hace casi 200 000 años y proceden del sur de Etiopía, de la formación rocosa de Kibish, situada en el valle del río Omo. Por otro lado, el fósil de *Homo sapiens* más antiguo del que se ha podido recuperar ADN data de hace tan solo 45 000 años y procede de Siberia, de la orilla del río Irtysh. Es muy difícil, pues, determinar si los fósiles anteriores son nuestros ascendientes directos o no, por lo que el árbol genealógico de nuestra especie es incompleto y tiene un amplio margen para ser mejorado. Uno de los principales indicadores de la evolución humana, junto a los fósiles, es la actual distribución en los humanos del ADN mitocondrial y del cromosoma Y, que caracterizan, respectivamente, la descendencia por línea materna y paterna. Estudios genéticos con poblaciones actuales indican que toda la humanidad proviene de una única hembra antecesora común —la denominada Eva mitocondrial— que habría vivido hace entre 99 000 y 148 000 años, y un único macho antecesor común —Adán cromosómico—, que surgió hace entre 120 000 y 156 000 años. Ambos eran africanos.

Por otro lado, nuestra especie ha convivido hasta hace pocas decenas de miles de años con otras especies de *Homo* desaparecidas en la actualidad, por ejemplo el *Homo neanderthalensis*, conocido también como hombre de Neandertal. Se tiene la casi plena certeza de que ambas especies son líneas evolutivas paralelas derivadas del *Homo ergaster*. El análisis del ADN mitocondrial indica un ancestro femenino común hace aproximadamente un millón de años. El hombre de Neandertal evolucionó en Europa y Oriente Medio hace unos 230 000

años, presentando claras adaptaciones al clima frío de la época, como complexión baja y fuerte o nariz ancha. Con la expansión del *Homo sapiens*, se fue retirando a la periferia de su área de distribución donde desapareció hace unos 28 000 años, aunque análisis genéticos con poblaciones actuales señalan que hubo una cierta hibridación. El *Homo sapiens* evolucionó en África y empezó a dispersarse por todo el mundo hace unos 100 000 años (figura 3). La expansión por Asia probablemente tuvo lugar a través de la península arábiga y de allí al subcontinente indio. La llegada a Australia y Nueva Guinea ocurrió hace unos 50 000 años, mediante la fabricación de balsas rústicas para ir saltando de isla en isla. Algunas de las islas más alejadas, como las de Hawái o Nueva Zelanda, no fueron pobladas hasta hace unos 2 000 o 1 500 años, cuando las técnicas navales llegaron a un desarrollo suficiente. La llegada a Europa ocurrió hace tan solo unos 40 000 años, ya que al parecer el desierto de Siria era una barrera infranqueable desde África. La llegada a América se habría iniciado hace unos 15 000 años, aunque no hay consenso al respecto. Pero fue posible, ya que durante la última glaciación el estrecho de Bering que separa Asia y América se encontraba cubierto de hielo.

Hace unos diez mil años, coincidiendo con el principio del actual periodo interglacial, el hombre cambió su comportamiento nómada por uno mucho más sedentario, vinculado al desarrollo de la agricultura y la ganadería. Este periodo se conoce como

La definición más satisfactoria del hombre desde el punto de vista científico es, probablemente, «el fabricante de herramientas».

KENNETH OAKLEY, ANTROPÓLOGO

FIG. 3

The map illustrates the migration routes of *Homo sapiens* from Africa. The routes are marked with arrows and dates in thousands of years (ky):

- 200,000: Origin in Africa.
- 100,000: Migration into the Middle East.
- 70,000: Migration into Europe.
- 40,000: Migration into Northern Europe.
- 25,000: Migration into Northern Asia.
- 15,000: Migration into Northern Asia (East).
- 12,000: Migration into North America.
- 4,500: Migration into South America.
- 30,000: Migration into Southeast Asia.
- 50,000: Migration into Australia.
- 15,000: Migration into Oceania.

Esquema de la expansión del *Homo sapiens* desde África a todo el mundo.

150

LA VIDA

- DOMÍNGUEZ, H., *Nuestra atmósfera. Comprender los cambios climáticos*, México D.F., Lectorum, 2004.
- GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia*, Barcelona, Crítica, 2004.
- HAZEN, R.M., *La historia de la Tierra. Los primeros 4500 millones de años. Del polvo estelar al planeta viviente*, Barcelona, Océano, 2014.
- MONROE, J.S., WICANDER, R. Y POZO, M., *Geología. Dinámica y evolución de la Tierra*, Madrid, Paraninfo, 2008.
- REDFERN, M., *50 cosas que hay que saber sobre la Tierra*, Barcelona, Ariel, 2013.
- ROSSI, S., *El planeta azul. Un universo en extinción*, Barcelona, Debate, 2011.
- SAGAN, C., *Cosmos*, Barcelona, Planeta, 2004.
- SESÉ, C. Y ALONSO, M.A., *Historia de la Tierra y de la vida*, Madrid, CSIC, 1988.
- TAYLOR, S.R., *Nuestro Sistema Solar y su lugar en el cosmos*, Madrid, Ediciones Akal, 2003.
- TRIGO, J.M., *El origen del Sistema Solar*, Madrid, Universidad Complutense, 2001.

- ácido nucleico 116, 138, 139, 141
 aminoácido 116,
 anticiclón 122
 atmósfera (terrestre) 11, 43-45, 106, 107, 110, 116-118, 120, 124, 131-134, 140, 146
 átomo 36, 38, 44, 94, 139
 australopitecos 147, 148
 autótrofo 44, 133-135

 biodiversidad 133, 134, 140
 biomasa 32, 129, 132-134

 cadena
 montañosa 29, 62, 76
 trófica 44, 133, 135
 campo
 gravitatorio 31, 76, 91, 92
 magnético 9, 46, 88, 89, 96, 105, 125, 126
 carga eléctrica 44

 célula 7, 8, 36, 44, 106, 120-122, 131, 132, 138-141
 ciclón 9, 121, 122
 compuesto
 inorgánico 44, 133
 orgánico 133, 134
 volátil 42
 continente 16, 19, 20, 28, 29, 30, 61, 70-72, 74, 76-79, 85, 86, 92, 93, 96, 97, 100, 107, 108, 110, 112, 113, 122, 134, 135, 141, 146, 149
 corriente de convección 46, 88, 90, 94, 95, 117, 121, 125
 corteza terrestre 30, 83, 84, 86, 90-97, 125, 135, 137
 cuenca
 hidrográfica 116
 sedimentaria 84, 98

 datación radiométrica 27, 38, 100

densidad 23, 31, 37, 43, 44, 78,
79, 84-86, 88, 90-94, 110, 120,
134, 135, 137

ecuador 22, 23, 36, 46-48, 50, 51,
69, 71, 120, 122, 134

elemento (químico) 38, 44, 85,
92, 93, 100, 116, 139

energía 43, 44, 46, 94, 106, 112,
116, 131-135, 138, 139, 144,
146, 150

especie 8, 26-28, 32, 53, 62, 88,
99, 129, 132, 133, 135, 136,
141-144, 146-149

espectro electromagnético 45

eucariota 140-142

flisión atómica 84

fósil 26, 27, 29, 46, 80, 99, 100,
118, 132, 136, 138, 140, 141,
143-148

fotosíntesis 44, 132-134, 140

frecuencia (de una onda) 8, 36,
38, 44, 45, 124, 136

fuerza 10, 22-25, 30, 37, 46, 56,
58, 76, 81, 94, 100, 102, 126,
128

fusión atómica 38, 43

geografía 19, 20, 29, 64, 69, 72,
78, 100

geología 16, 26, 46, 84, 88, 97,
98

geometría
esférica 63, 68
plana 61, 63, 68, 69

gravedad 16, 22, 24, 37, 46, 56,
58, 72, 74, 102

hidrosfera (terrestre) 106, 107,
113, 132

homínido 147

Homo 132, 147-150

ión 124

isótopo 84, 138

lago 116

latitud 19, 22, 47, 48, 50, 72, 107,
120, 12, 134

línea de fuerza 46, 126, 128

lluvia 97, 100, 107, 116, 122, 134,
144

longitud 16, 18, 19, 22, 45, 47, 48,
69, 86, 87, 96, 100

luz 18, 38, 40, 44, 45, 47, 50-54, 74,
134, 135

magma 92, 93, 96, 97, 125

magnetosfera (terrestre) 46, 105,
106, 125-127

manto (terrestre) 77, 83, 84, 86,
88, 90-95, 98

mar 20, 56, 58, 62, 72, 74, 76-78,
91, 93, 111, 112, 114, 116, 120,
144, 145

marea 56-58, 76

masa 22-25, 29, 31, 38, 42-44, 56,
70, 72, 74, 76, 88, 90, 92, 96, 98,
106, 107, 110-112, 117, 120,
133, 140, 146

meridiano 22, 23, 47, 48, 63, 66

mineral 80, 92, 96-98, 113, 125,
138, 140

molécula 37, 38, 41, 45, 113, 116,
124, 132, 139

nieve 107, 112, 114, 116, 124

nube 37, 38, 41, 120

núcleo terrestre 35, 43, 83, 86-90,
94, 111, 125, 140, 141

nucleótido 116

océano 29, 30, 43, 56, 61, 62,
70-72, 74, 76, 77, 81, 86, 91-93,
96, 100, 106-108, 110-114, 116,
120, 122, 124, 134, 145, 146

onda
electromagnética 46, 126, 127
sísmica 44, 45, 85-88, 90

orgánico 133, 134, 147

orogénesis 83, 100

paralelo 18, 22, 47, 48, 72

polo
geográfico 22, 23, 29, 36, 47,
48, 50, 51, 62, 63, 66, 71-73,
92, 107, 110, 111, 120-122,
125, 134
geomagnético 46, 51, 88, 89,
125, 126, 128

precipitación 98, 106, 107, 112,
113, 116, 120-122, 124, 134, 144

presión 38, 43, 44, 84-86, 90, 98,
120-123, 125, 140

procariota 141

producción primaria 133-135

proteína 116, 139, 148

proyección (gráfica) 63-67, 69, 71

quimiosíntesis 133, 135

radiación
electromagnética 8, 36, 44, 45,
118
infrarroja 45
solar 9, 10, 36, 44, 45, 49, 51,
105, 106, 110, 112, 116, 117,
119, 122, 124, 133-135
ultravioleta 45, 124, 132

radiactividad 100, 144

río 114-116, 148

roca
ígneas 98
metamórficas 98
sedimentaria 98, 137

saturación 120

sismicidad 10, 83

sistema fluvial 106, 107

temperatura 23, 36-38, 42, 44, 45,
51, 84-86, 88, 90, 106, 110-112,
116-118, 120, 122, 124, 135, 146

viento 46, 97, 102, 105, 122, 126,
128

vulcanismo 10, 83, 137

La Tierra

Vivimos sobre una enorme acumulación de materia de forma esférica que viaja a gran velocidad por el espacio. Sus movimientos respecto al Sol son los que ejercen mayor influencia sobre nosotros. De hecho, la energía solar condiciona por completo las características de la Tierra, el único lugar del universo donde, a día de hoy, sabemos que se ha desarrollado la vida tal como la entendemos. Para ello ha sido esencial la enorme cantidad de agua líquida que se encuentra en su superficie, así como la capa gaseosa que la cubre. Ambas capas fluidas interactúan entre sí y con las fuerzas internas del planeta, formando un complejo sistema que cada día vamos comprendiendo mejor.

Joel Gabàs Masip es arquitecto, doctor en informática y escritor de divulgación científica.